



Instituto Geológico
y Minero de España



XUNTA DE GALICIA
CONSELLERÍA DE INNOVACIÓN,
INDUSTRIA E COMERCIO

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y DE LAS CONDICIONES DE CAPTACIÓN PARA LA MEJORA DEL APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDROMINERALES DE LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE GALICIA

VOLUMEN V

**CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL
ESTABLECIMIENTO DE UNA
METODOLOGÍA PARA LA PROTECCIÓN DE
LOS ACUÍFEROS FISURADOS**

2004

PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LOS RECURSOS HIDROMINERALES EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE GALICIA (Aguas minerales, termales y de manantial)

1. Marco legal referente a las aguas minerales y termales en Galicia
 - 1.1. Legislación estatal
 - 1.2. Legislación autonómica
 - Ley 5/1995
 - Decreto 402/1996
 - Orden de 5 de noviembre de 1996
 - Decreto 116/2001
 - Modificación del Real Decreto 1/2001 en la Ley 62/2003
 - 1.3. Adecuación legislativa. Aspectos a reconsiderar en futuras modificaciones del marco legal
2. Metodología para la delimitación de perímetros de protección de los recursos hidrominerales en la Comunidad Autónoma de Galicia
 - 2.1. Los perímetros de protección de captaciones. Conceptos básicos
 - 2.2. Perímetros de protección de captaciones de recursos hidrominerales. Particularidades en su delimitación
 - 2.3. Características específicas de los medios fisurados
 - 2.4. Evaluar si el acuífero captado se comporta como un medio con porosidad intergranular o asimilable a la escala de la captación
 - 2.5. Métodos hidrogeológicos y trazadores
 - 2.6. Métodos en medios asimilables a porosidad intergranular
 - 2.7. Métodos de vulnerabilidad. Fundamentos y datos requeridos
 - Métodos aplicables en diversos medios
 - 2.7.1. PI
 - 2.7.2. DRASTIC
 - 2.7.3. SINTACS
 - 2.7.4. GOD
 - Métodos específicos para medios fisurados
 - 2.7.5. DISCO
 - 2.8. Empleo de contornos de probabilidad para delimitación de perímetros de protección
 - 2.9. Método de Bolsenkötter
 - 2.10. Delimitación de perímetros de protección de la cantidad
3. Análisis comparativo de los resultados de aplicar diferentes métodos a zonas piloto para la obtención de metodologías aplicables

generalizadamente a las captaciones de aguas minerales y termales en Galicia

- 3.1. Características de la zona seleccionada: Balneario de Laias
 - 3.1.1 Marco geográfico y población
 - 3.1.2 Marco geológico
 - 3.1.3 Marco hidrogeológico
 - 3.1.4 Hidrogeología e hidroquímica
 - 3.1.5 Focos potenciales de contaminación
 - 3.1.6 Ordenación del territorio
 - 3.1.7 Perímetro de protección vigente
- 3.2. Información disponible para la aplicación de los diferentes métodos
 - 3.2.1 Aplicación de métodos hidrogeológicos y trazadores
 - 3.2.2 Métodos en medios asimilables a porosidad intergranular
 - 3.2.3 Aplicación del método PI
 - 3.2.4 Aplicación de del método DRASTIC
 - 3.2.5 Aplicación del método SINTACS
 - 3.2.6 Aplicación del método GOD
 - 3.2.7 Aplicación del método DISCO
 - 3.2.8 Aplicación del método de los contornos de probabilidad
 - 3.2.9 Aplicación del método de Bölsenkötter
- 3.3. Información que es necesario obtener para la aplicación de los diferentes métodos
 - 3.3.1 Aplicación de métodos hidrogeológicos y trazadores
 - 3.3.2 Métodos en medios asimilables a porosidad intergranular
 - 3.3.3 Aplicación del método PI
 - 3.3.4 Aplicación de del método DRASTIC
 - 3.3.5 Aplicación del método SINTACS
 - 3.3.6 Aplicación del método GOD
 - 3.3.7 Aplicación del método DISCO
 - 3.3.8 Aplicación del método de los contornos de probabilidad
 - 3.3.9 Aplicación del método de Bölsenkötter
- 3.4. Información requerida para la aplicación de la metodología para la protección de la cantidad
 - 3.2.1 Datos existentes para la protección de la cantidad
 - 3.2.2 Datos no disponibles para la protección de la cantidad
4. Propuesta de actividades a efectuar en la segunda fase (futuro convenio)

- 4.1. Propuesta de modificaciones legales
- 4.2. Actividades a realizar en futuras actuaciones
- 5. Referencias bibliográficas

1. Marco legal referente a las aguas minerales y termales en Galicia

1.1. Legislación estatal

La normativa vigente (Fernández Sánchez, 2001) puede agruparse en tres grupos:

- *Legislación de minas*

La Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas (BOE nº 176, de 24 de julio de 1973) regula la declaración, explotación y protección del recurso. Ha sido desarrollada por el Reglamento General para el Régimen de la Minería aprobado por el Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto (BOE 295 y 296 de 11 y 12 de diciembre de 1978).

Esta normativa permanece vigente en las comunidades autónomas que no han promulgado legislación propia, y de modo subsidiario en las cuatro que lo han hecho (Cantabria, Castilla-La Mancha, Extremadura y Galicia).

- *Normativa sobre uso balneario*

El uso balneario está regulado por el Estatuto de la Explotación de Manantiales de Aguas Mineromedicinales, aprobado por el Real Decreto Ley de 25 de abril de 1928 (Gaceta de Madrid, nº 177, de 26 de abril de 1928).

El Título I (de la propiedad de las aguas mineromedicinales y de sus derechos y obligaciones), Título III (del expediente sobre declaración de utilidad pública y demás trámites para la explotación de aguas mineromedicinales) y el artículo 77 (sobre abandono, cierre o cambio de uso de los manantiales mineromedicinales) fueron derogados por la Ley de Minas de 1973. El resto de su contenido relativo a uso de marcas, envases y etiquetas, asistencia médica en los balnearios, sanciones y Asociación Nacional de la Propiedad Balnearia no ha sido derogado expresamente en disposiciones posteriores, por lo que continúa vigente en cuanto no se oponga a lo legislado por una comunidad autónoma dentro de su territorio.

- *Normativa sobre aguas de bebida envasada*

La utilización de aguas minerales para este uso está regulada por la Reglamentación Técnico-Sanitaria para la elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasada, aprobada por el Real Decreto 1164/1991 de 22 de julio (BOE nº 178, de 26 de julio de 1991) y modificada por el Real Decreto 781/1998 de 30 de abril (BOE nº 121, de 21 de mayo de 1998).

1.2. Legislación autonómica

Las funciones desempeñadas anteriormente por la Administración Central en materia de aguas minerales, tanto en los aspectos sanitarios como en los mineros, fueron transferidas a las comunidades autónomas entre los años 1982 y 1985. Dichas funciones incluyen la potestad legislativa, aunque hasta el momento solamente las comunidades autónomas de Cantabria, Castilla-La Mancha, Extremadura y Galicia han establecido legislación propia (Fernández Sánchez, 2001).

Las competencias exclusivas de la Comunidad Autónoma de Galicia en materia de aguas minerales y termales objeto de este capítulo, fueron establecidas en

el artículo 27.14 de la Ley Orgánica 1/1981, de 6 de abril, por la que se aprueba su Estatuto de Autonomía. Dichas funciones le fueron transferidas por el Real Decreto 1706/1982, de 24 de julio, respecto a los temas sanitarios y mediante el Real Decreto 2563/1982, de 24 de julio, en temas mineros.

El parlamento de Galicia aprobó la Ley 5/1995, de 7 de junio, de regulación de las aguas minerales, termales, de manantial y de los establecimientos balnearios de Galicia (BOE nº 173, de 21 de julio de 1995). Por Decreto 402/1996, de 31 de octubre (DOG nº 226, de 19 de noviembre de 1996) se aprobó el Reglamento de aprovechamiento de las aguas mineromedicinales, termales y de los establecimientos balnearios. La Orden de 5 de noviembre de 1996 /DOG nº 227, de 20 de noviembre de 1996, regula la autorización sanitaria de los establecimientos balnearios de la Comunidad Autónoma de Galicia. Finalmente el Decreto 116/2001, de 10 de mayo, modificó el Decreto 402/1996, de 31 de octubre (DOG nº 102, de 28 de mayo de 2001).

La legislación de Galicia clasifica los recursos en: aguas minerales (que incluyen las mineromedicinales, minerindustriales y minerales naturales), aguas termales y aguas de manantial.

En dicha legislación se efectúa una regulación de las características del perímetro de protección del acuífero, que no obstante ha sufrido diversas modificaciones para adecuarse a las características socioeconómicas e hidrogeológicas de la Comunidad e incrementar su eficacia.

Las principales características que afectan a la delimitación e implantación efectiva de los perímetros de protección, objetivo de este informe, son las siguientes:

Ley 5/1995

La Ley 5/1995, de 7 de junio, de regulación de las aguas minerales, termales, de manantial y de los establecimientos balnearios de la Comunidad Autónoma de Galicia indica que para poder ejercer el derecho al aprovechamiento de las aguas minerales, termales y de manantial se necesita solicitar su concesión administrativa, aportando un proyecto general de aprovechamiento, debiéndose fijar además un perímetro de protección para la conservación del acuífero (artículo 13) aportando un estudio que justifique su necesidad y la delimitación propuesta.

El perímetro de protección, definido por coordenadas geográficas, estará constituido por tres zonas (de restricciones máximas, medias y mínimas) delimitadas empleando un criterio de tiempo de tránsito (tiempo que transcurre entre la entrada de una sustancia en el acuífero y su extracción por la captación). En esas zonas se limitarán las actividades que pueden realizarse. Indica que al inicio del aprovechamiento de las aguas el titular debe disponer de los terrenos que comprendan la zona de restricciones máximas (artículo 13).

La efectividad de dichos perímetros depende del alcance real de las limitaciones a establecer en su interior, debiéndose plantear si deben o no ser indemnizados por el titular del aprovechamiento los terceros perjudicados por las mismas. La ley de Galicia se pronuncia en pro de la no indemnización (artículos 13 y 17).

Así indica (artículo 17) que la concesión o autorización otorga el derecho exclusivo a utilizarlas y que el órgano competente, a instancias del titular, efectuará las medidas precisas para impedir que en el ámbito del perímetro de protección autorizado se efectúen trabajos o actividades que pudieran perjudicar el normal aprovechamiento de las aguas. Esos trabajos o actividades deben contar previamente con la autorización del órgano competente. Regula además que dicho titular tiene derecho al aprovechamiento de las aguas que se encuentren dentro del perímetro de protección autorizado.

Por último cabe reseñar que se crea en la Consellería competente en materia de industria el Registro de Aguas Minerales, Termas y de Manantial en el que (artículo 21) se inscriben de oficio las declaraciones o reconocimientos y los aprovechamientos legalmente constituidos.

Decreto 402/1996

El Decreto 402/1996, de 31 de octubre, por el que se aprueba el reglamento de aprovechamiento de las aguas mineromedicinales, termas y de los establecimientos balnearios de la Comunidad Autónoma de Galicia desarrolla la Ley 5/1995.

Enumera las actividades que se regulan en las tres zonas en que se dividen los perímetros de protección (de restricciones máximas, medias y mínimas) detallando para cada una de ellas el nivel de limitación que les afecta (prohibido, condicionado). Esta regulación, detallada en el artículo 12 y anexo 1, ha sido modificada en el Decreto 116/2001 como se analizará posteriormente.

Indica (artículo 15) que la Delegación Provincial correspondiente determinará, tras analizar la documentación presentada por el interesado, el perímetro que resulte adecuado para garantizar la protección suficiente del acuífero en cantidad y calidad. Concluida la tramitación del expediente será la Consellería competente en materia de industria la que dicte la resolución que procede (artículo 16).

Orden de 5 de noviembre de 1996

La Orden de 5 de noviembre de 1996, por la que se regula la autorización sanitaria de los establecimientos balnearios de la Comunidad Autónoma de Galicia contempla que los establecimientos balnearios deben acompañar a la solicitud de autorización sanitaria previa para su instalación entre otros el documento que acredite poseer los derechos que comporta la concesión o autorización de aprovechamiento de las aguas mineromedicinales o termas para usos terapéuticos y la designación del perímetro de protección (artículo 4).

Indica además (anexo I) que el manantial, la captación del agua y su perímetro de protección correspondiente a la zona de restricciones máximas se mantendrá con las medidas preventivas adecuadas para evitar posibles contaminaciones.

Decreto 116/2001

El Decreto 116/2001, de 10 de mayo, por el que se modifica el Decreto 402/1996, de 31 de octubre, por el que se aprueba el reglamento de aprovechamiento de las aguas mineromedicinales, termas y de los establecimientos balnearios de la Comunidad Autónoma de Galicia respondió a

la necesidad de adaptarse a la imposibilidad práctica, en muchos casos, de aplicar las restricciones contempladas para el perímetro de protección en el Decreto 402/1996 que modifica.

Esta imposibilidad se debe a que la mayoría de manantiales de aguas mineromedicinales y termales de Galicia son explotados desde épocas muy antiguas y el crecimiento de las poblaciones, con múltiples actividades socioeconómicas los ha dejado integrados en éstas, alcanzando las restricciones en el perímetro una gran repercusión socioeconómica y legal. Además se producirían interferencias en competencias reguladas por otros preceptos legales referentes a medioambiente, gestión de residuos sólidos urbanos y el dominio público hidráulico.

La modificación de las restricciones contempladas en el perímetro de protección, en el anexo I del Decreto 116/2001, refuerza la protección en la zona de restricciones máximas y la reduce en las zonas de restricciones medias y mínimas. Esta regulación se complementa con aspectos reflejados en la legislación básica estatal entre la que cabe destacar la necesidad de autorización por parte de la Delegación Provincial de la Consellería competente en materia de industria de cualquier trabajo subterráneo o la apertura de un periodo de audiencia al titular de la concesión en los expedientes sobre actividades que puedan afectar al normal aprovechamiento de las aguas.

Las restricciones a establecer en las zonas de restricciones máximas, medias y mínimas en que se divide el perímetro de protección (Tabla 1-1), establecidas empleando como criterio el tiempo de tránsito (artículo 12 y anexo I) son las siguientes:

La zona de restricciones máximas comprende la zona de la captación y sus instalaciones asociadas limitándose las actividades permitidas a las derivadas de la propia explotación y aprovechamiento de sus instalaciones. Al inicio del aprovechamiento su titular deberá disponer de los terrenos que comprenda la zona de restricciones máximas.

Tabla 1-1: Restricciones a establecer en las zonas de restricciones medias y mínimas en los perímetros de protección en base a la legislación de la Comunidad Autónoma de Galicia.

ACTIVIDADES REGULADAS	ZONA DE RESTRICCIONES MEDIAS	ZONA DE RESTRICCIONES MÍNIMAS
A- Actividades relativas a residuos peligrosos:		
- Producción de residuos peligrosos	Prohibido el establecimiento de nuevas instalaciones	Prohibido el establecimiento de nuevas instalaciones
- Almacenamiento o estaciones de transferencia de residuos peligrosos	Prohibido	Prohibido
- Eliminación, valorización y/o vertido de residuos peligrosos	Prohibido	Prohibido
B- Actividades relativas a residuos urbanos y municipales:		
- Depósitos controlados de residuos urbanos no municipales	Prohibido	
- Almacenamiento y estaciones de transferencia de residuos urbanos no municipales	Prohibido	
- Plantas de valorización o tratamiento de residuos urbanos no municipales	Prohibido	
C- Actividades relativas a residuos radiactivos		
- Almacenamiento de residuos radiactivos	Prohibido	Prohibido

D- Actividades relativas a vertidos en superficie Vertidos en superficie de la relación I de sustancias indicadas en el Real Decreto 819/1986, de 11 de abril	Prohibido	Prohibido
E- Actividades relativas a otros vertidos Vertidos o almacenamiento profundo, mediante pozos, fosos, galerías, inyección o acumulación en estructuras subterráneas	Prohibido	

El reglamento indica (artículo 16) que una vez concluida la tramitación del expediente la Delegación Provincial elevará informe a la Dirección General competente en materia de aguas minerales y termales que dictará la resolución que proceda. Esta contemplará necesariamente, entre otros aspectos, la clase de aguas, el caudal máximo aprovechable, finalidad y forma de utilización de las aguas, condiciones de aprovechamiento y tratamientos autorizados, así como la delimitación del perímetro de protección y el tiempo máximo de explotación autorizado. Además una vez otorgada la concesión o autorización del aprovechamiento la Consellería competente en materia de industria remitirá una copia de esta a los organismos competentes de las diversas administraciones públicas con competencias específicas en el territorio afectado.

Los derechos otorgados al titular de la autorización o concesión de los aprovechamientos de aguas, aspecto fundamental para la implementación real de los perímetros de protección, quedan regulados en el artículo 18.1 que contempla:

- El derecho a la utilización exclusiva de las aguas en la forma, condiciones y tiempo que fije la resolución administrativa.
- La protección del acuífero en cantidad y calidad para su normal aprovechamiento, así como utilizar los medios legales necesarios para impedir que se realicen en el ámbito del perímetro de protección trabajos o actividades que pudieran perjudicar al acuífero o su normal aprovechamiento.
- El aprovechamiento de las aguas minerales que se encuentren en el perímetro de protección autorizado siempre que pertenezcan al mismo acuífero efectuando para ello los oportunos expedientes de declaración y aprovechamiento.

Además las restricciones específicas del perímetro de protección se complementan (artículo 18.2 y 18.3) con el requisito de que cualquier trabajo subterráneo que se realice en este debe contar previamente con autorización de la Delegación Provincial de la Consellería competente en materia de industria, debiendo además conceder audiencia al titular de la autorización o concesión antes de resolver los expedientes referentes a trabajos o actividades en dicho perímetro.

Modificación del Real Decreto 1/2001 en la Ley 62/2003

La modificación del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por la que se incorpora al derecho español la Directiva 2000/60/CE, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas (Unión Europea, 2000) en el capítulo V de la Ley 62/2003 de medidas fiscales, administrativas y de orden social de 31 de diciembre, especifica (artículo 99 bis) que para cada demarcación hidrográfica existirá al menos un registro de las zonas que hayan sido declaradas objeto de protección especial en virtud de norma específica

sobre protección de aguas superficiales o subterráneas o sobre conservación de hábitats.

Ese registro debe incluir los perímetros de protección de aguas minerales y termales, todos los perímetros de protección delimitados de aguas destinadas al consumo humano, las zonas que el Plan Hidrológico contemple para este uso en el futuro, zonas declaradas vulnerables como protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos, zonas declaradas sensibles en virtud de normas sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, las destinadas a protección de hábitats o especies, así como las masas de agua declaradas de uso recreativo.

Se establecerán además programas de seguimiento del estado de las aguas, que en el caso de las aguas subterráneas incluye su estado químico y su estado cuantitativo, alcanzando mayor precisión en las zonas protegidas.

1.3. Adecuación legislativa. Aspectos a reconsiderar en futuras modificaciones del marco legal

La legislación promulgada sobre las aguas minerales y termales por la Comunidad Autónoma de Galicia en virtud de sus competencias exclusivas sobre la materia ha regulado muy positivamente un sector de gran relevancia social y económica en dicha Comunidad. La aplicación efectiva de las restricciones que conllevan los perímetros de protección motivó la adecuación de éstas en el Decreto 402/1996 antes analizado.

La legislación vigente establece que los perímetros de protección se subdividen en tres zonas de restricciones (máximas, medias y mínimas) delimitadas aplicando como criterio el tiempo de tránsito.

Las diferentes características de los recursos hidrominerales, aguas minerales (mineromedicinales, mineroindustriales y minerales naturales), aguas termales y aguas de manantial, en los que debe establecerse perímetro de protección para su salvaguarda, las diferencias en la antigüedad de las aguas captadas, en las características hidrogeológicas del acuífero (medios con porosidad intergranular, kársticos y fisurados) así como en las actividades socioeconómicas que existen en su área de recarga y descarga hacen necesario emplear frecuentemente métodos diferentes y adecuados a esta problemática.

En este informe se analiza en los apartados 2 y 3 la metodología que se considera a priori más adecuada para la delimitación de perímetros de protección, planteándose su contraste en zonas piloto para su posterior extrapolación a la protección del recurso hidromineral en la Comunidad Autónoma de Galicia.

El problema podría surgir ante la eventual conveniencia, desde consideraciones metodológicas, de emplear métodos de evaluación de la vulnerabilidad que al no emplear el tiempo de tránsito requerirían una eventual modificación de la legislación que actualmente solo contempla el empleo del tiempo de tránsito.

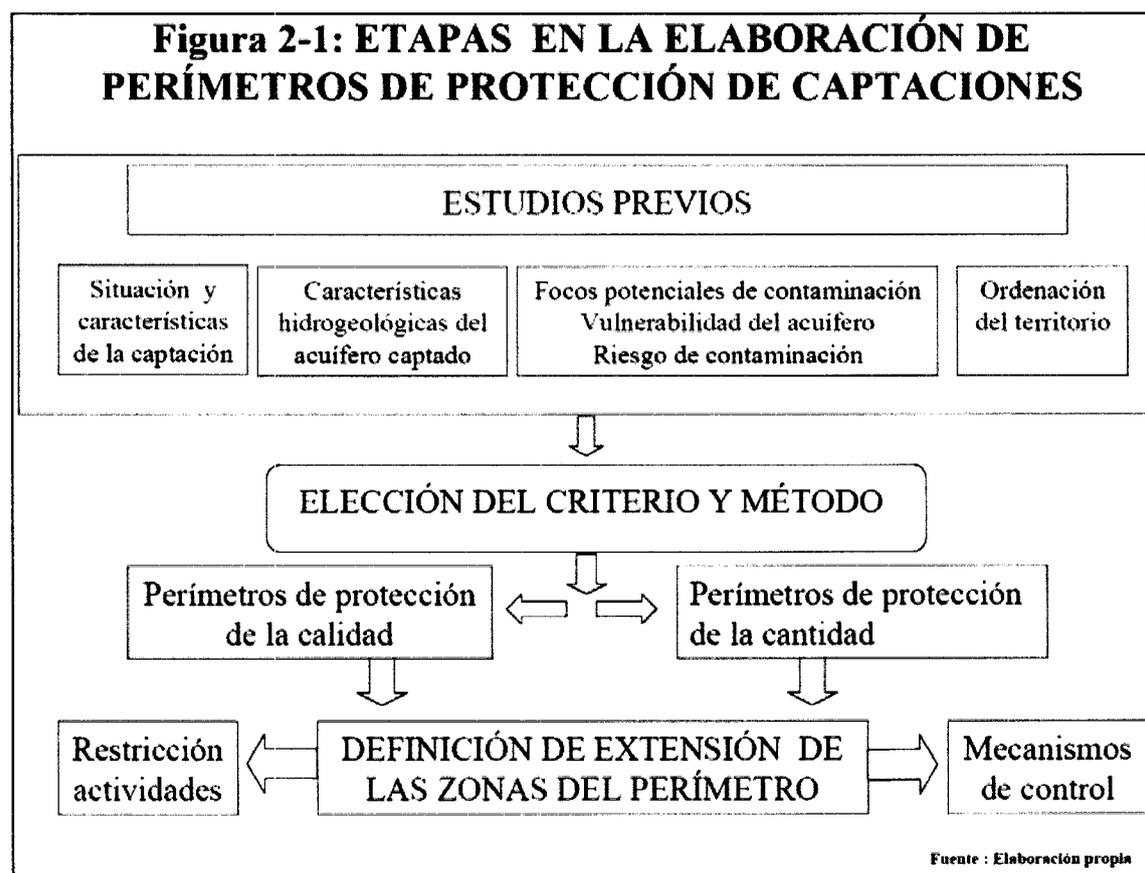
2. Metodología para la delimitación de perímetros de protección de los recursos hidrominerales en la Comunidad Autónoma de Galicia

2.1. Los perímetros de protección de captaciones. Conceptos básicos

Los perímetros de protección son un área en torno a una captación en la cual de forma graduada se restringen o prohíben las actividades o instalaciones susceptibles de contaminar las aguas subterráneas o que afecten al caudal extraído.

Su división en zonas, con diferentes regulaciones a las actividades o instalaciones allí ubicadas, permite encontrar un compromiso entre una protección adecuada del recurso y el desarrollo de la actividad socioeconómica de la región circundante.

El esquema general de trabajo en la delimitación de un perímetro de protección de una captación de agua subterránea, ya sea destinada al consumo humano o hidromineral, es el representado en la figura 2-1.



La zonificación empleada con mayor frecuencia para la protección frente a la contaminación en las propuestas de perímetros de protección en España, como se esquematiza en la figura 2-2, es la siguiente:

- **Zona inmediata o de restricciones absolutas:** el criterio de delimitación suele ser un tiempo de tránsito de 1 día o un área fijada de forma arbitraria de pequeña extensión (100 a 400 m²). Estará vallada para impedir el acceso de personal no autorizado a las captaciones.
- **Zona próxima o de restricciones máximas:** se dimensiona generalmente en función de un tiempo de tránsito de 50 días, que permite proteger contra la contaminación microbiológica, utilizando también criterios hidrogeológicos. En algunos estudios no obstante se ha delimitado también empleando un criterio de descenso o de poder autodepurador del terreno.
- **Zona alejada o de restricciones moderadas:** el criterio más utilizado para su dimensionado es un tiempo de tránsito de varios años, criterios de tipo hidrogeológico o una combinación de ambos, pudiéndose emplear también la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero para definirla. Su objetivo es proteger la captación frente a contaminantes de larga persistencia. El tiempo de tránsito empleado en esta zona de restricciones moderadas se ha definido frecuentemente en función de los focos potenciales de contaminación existentes en el entorno de la captación, y de las características hidrogeológicas del acuífero captado, empleándose valores muy dispares en el estudio.

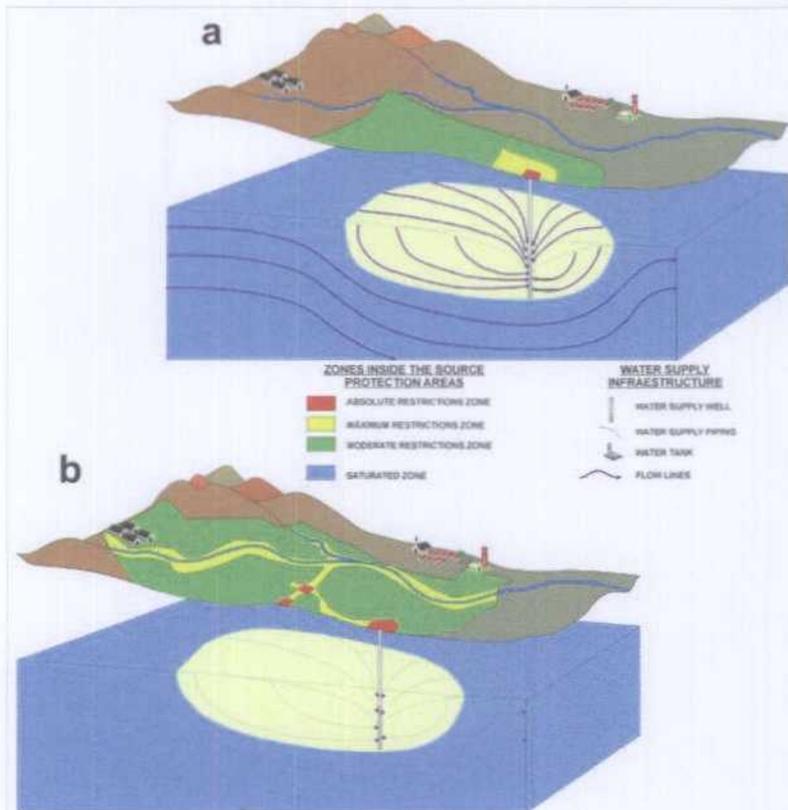
Una propuesta de modificación de esta zonación para las captaciones de aguas subterráneas para abastecimiento público (MIMAM, 2002 a y 2002 b) contemplaría:

- “Zona 0 o de protección sanitaria” que representaría el ámbito de protección inmediata a la captación y estaría vallada.
- “Zona I de protección microbiológica” que abarcaría desde la anterior hasta la isocrona de 50 días para garantizar una protección contra la contaminación microbiológica.
- “Zona II de dilución y control”. Protegería frente a contaminantes químicos de larga persistencia, principalmente no degradables limitándose mediante la isocrona de 5 años.
- “Zona III de captación”. Abarca toda el área de alimentación de la captación.

Además hay que resaltar que aunque lo más habitual es proponer tres zonas continuas en su extensión existe, debido a las diferencias metodológicas requeridas para la delimitación de perímetros de protección en diversos medios, la posibilidad de delimitar zonas no continuas con restricciones similares, así como zonas satélite de protección. Éstas son especialmente recomendables cuando existen zonas con comunicación preferente con la captación independientemente de su distancia la misma, circunstancia habitual en los medios kársticos y fisurados.

Por último otros autores (Melioris-Krahulec, 1993 en Melioris, 2000), dividen la protección de las estructuras hidrogeológicas que contengan aguas minerales en:

- **Zona de protección de primer nivel:** Protege el área de descarga. Área en la que las aguas minerales llegan a la superficie mediante manantiales o captaciones artificiales. Su objetivo es lograr la estabilidad en cantidad y calidad del recurso en este área.
- **Zona de protección de segundo nivel:** Protege la zona de formación acumulación y circulación de las aguas minerales en su entorno geológico.
- **Zona de protección de tercer nivel:** Protege la zona de recarga de las precipitaciones sobre el acuífero.



Métodos para acuíferos con porosidad intergranular o asimilables (a)

Métodos para acuíferos kársticos y para acuíferos fisurados (b)

Fuente: Martínez Navarrete y García García, 2003

Figura 2-2: Zonación de los perímetros de protección en diversos medios.

La zonación y restricciones que se establecen se definen habitualmente en función de la naturaleza de los materiales captados (medios con porosidad intergranular o asimilables en su funcionamiento a los mismos, kársticos y fisurados), los parámetros hidráulicos de los acuíferos y las características socioeconómicas, empleándose diferentes criterios para delimitar las zonas. Éstos son:

- Distancia

Consiste en delimitar arbitrariamente un área en torno a la captación.

Es el más elemental, pudiendo valorarse como poco eficaz, puesto que no incorpora consideraciones sobre las condiciones de flujo del agua subterránea, ni respecto a los procesos implicados en el transporte de los contaminantes en cada caso particular.

- Descenso

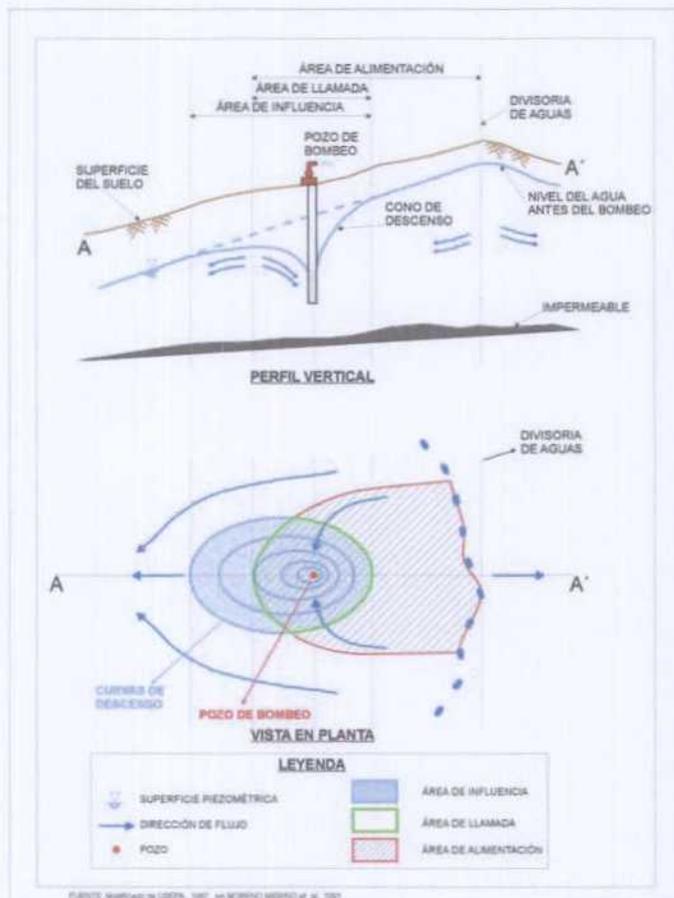


Figura 2-3: Área de influencia y área de alimentación en un acuífero con gradiente hidráulico en régimen estacionario.

Se basa en considerar que el área en la cual desciende el nivel del agua subterránea, debido al efecto del bombeo, se producen cambios en la dirección del flujo subterráneo y un aumento de la velocidad con la que el agua llega a la captación, debido al incremento del gradiente hidráulico, produciendo o acelerando la migración del contaminante hacia ella. Ha sido mal aplicado en numerosas ocasiones debido a la idea errónea de que el área de alimentación y el área de influencia coinciden (figura 2-3). Esto sólo es cierto en aquellas zonas en las cuales antes de comenzar a bombear no haya gradiente hidráulico o éste sea despreciable.

- Tiempo de tránsito

Mediante este criterio se evalúa el tiempo que un contaminante tardaría en llegar a la captación que se pretende proteger.

Los cálculos para la determinación del tiempo de tránsito se realizan considerando principalmente el proceso de advección, que es el más conocido y el que tiene mayor importancia en acuíferos con alta velocidad de flujo, si bien también tiene en cuenta la dispersión hidrodinámica y la interacción sólido-soluto que adquieren mayor relevancia en aquellos acuíferos en que la velocidad de flujo es menor.

Es uno de los criterios más exactos que existen puesto que considera diversos factores que afectan a la evaluación del proceso.

Su objetivo es definir zonas alrededor de las captaciones con la suficiente amplitud para que el resultado de una actividad contaminante tarde en llegar a la misma un tiempo determinado que permita su degradación, o proporcione una capacidad de reacción que haga posible un cambio temporal, hasta que la degradación de la calidad de las aguas extraídas disminuya a límites aceptables.

- Criterios hidrogeológicos

Su elección se fundamenta en la asunción de que una contaminación que se produjese en el área de alimentación de una captación podría alcanzarla

transcurrido un cierto periodo de tiempo, por lo que debe delimitarse ésta y protegerla en su totalidad.

Para ello se han de identificar los límites hidrogeológicos (ríos, canales, lagos divisorias piezométricas y materiales impermeables entre otros) que delimitan el área en la cual el agua procedente de la precipitación después de infiltrarse llegar a alcanzar la captación.

Su aplicación implica en muchas ocasiones la protección de un área mayor de la necesaria y su empleo es también muy usual en acuíferos pequeños, en los que el tiempo de tránsito hasta los límites es muy reducido, por lo que disminuye notablemente el área sobreprotegida.

Su utilización es recomendable en conjunción con otros criterios tanto para valorar si los límites hidrogeológicos existentes van a restringir su utilización como para modificar, cuando sea preciso, los resultados que éstos puedan proporcionar.

- Poder autodepurador del terreno.

Consiste en utilizar la capacidad que poseen los diferentes terrenos para atenuar la concentración de los contaminantes que los atraviesan (procesos físicos, químicos y biológicos que actúan de modo diferente para cada contaminante) como criterio para definir la extensión de éstos que debe recorrer un agua contaminada hasta alcanzar una calidad admisible para el consumo humano.

Su aplicación requiere el análisis detallado del perfil edafológico, textura, estructura, composición mineralógica, porosidad, así como las características propias de cada contaminante que sea preciso considerar.

En la Tabla 2-1 se relacionan los criterios existentes con el proceso físico que controlan.

Tabla 2-1: Relación entre los criterios que pueden emplearse en la delimitación de perímetros de protección y los procesos físicos que controlan.

Criterio	Proceso físico	Distancia	Descenso	Tiempo de tránsito	Criterios hidrogeológicos	Poder autodepurador del terreno
Advección			●	●	●	
Dispersión hidrodinámica (dispersión mecánica y difusión molecular)				●		●
Interacción sólido-soluto (reacciones químicas de adsorción)				●		●

Fuente : USEPA, 1987

Los métodos aplicados para la delimitación de las diferentes zonas en que se subdividen los perímetros de protección varían en función de los materiales que constituyen el acuífero.

Así, en medios con porosidad intergranular o asimilables, en los que se asume que son relativamente homogéneos en que puede aplicarse la Ley de Darcy, es en los que más métodos y con mayor precisión pueden aplicarse, como se verá en el apartado 2.6.

En los medios kársticos y en los fisurados, que no sean asimilables en su funcionamiento a medios con porosidad intergranular, se restringe

considerablemente el número de métodos que es factible aplicar, tanto analíticos como modelos matemáticos que deben ser específicos para esos medios heterogéneos, por lo que es común el empleo de ensayos de trazadores y de métodos de evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos.

Las regulaciones y restricciones a diversas actividades e instalaciones en las diferentes zonas de los perímetros de protección son muy variadas. Generalmente afectan a actividades de tipo agropecuario, urbano e industrial principalmente pudiendo variar en cada caso particular, como se observa en la tabla 2-2.

Tabla 2-2: Restricciones a diversas actividades en el ámbito del perímetro de protección.

	CATEGORÍA DE ACTIVIDADES	ZONA DE RESTRICCIONES MÁXIMAS	ZONA DE RESTRICCIONES MÁXIMAS						
			Prohibido	Prohib.	Cond.*	Permit.	Prohib.	Cond.*	Permitido
AGROPECUARIO	Uso de fertilizantes		•	•				•	
	Uso de herbicidas		•	•				•	
	Uso de pesticidas		•	•				•	
	Almacenamiento de estiércol		•	•				•	
	Vertido de restos de animales		•	•				•	
	Ganadería intensiva		•	•				•	
	Ganadería extensiva		•	•				•	•
	Almacenamiento de materias fermentables para alimentación del ganado		•	•				•	
	Abrevaderos y refugios de ganado		•	•				•	
	Silos		•	•				•	
URBANO	Vertidos de aguas residuales urbanas sobre el terreno		•	•				•	
	Vertidos de aguas residuales urbanas en fosas sépticas o lodos		•	•				•	
	Vertidos de aguas residuales urbanas en cauces públicos		•	•				•	
	Vertido de residuos sólidos urbanos		•	•				•	
	Cementerios		•	•				•	
			•	•				•	
INDUSTRIAL	Asentamientos industriales		•	•				•	
	Vertido de residuos líquidos industriales		•	•			•		
	Vertido de residuos sólidos industriales		•	•			•		
	Almacenamiento de hidrocarburos		•	•				•	
	Depósito de productos radiactivos		•	•			•		
	Inyección de residuos industriales en pozos y sondeos		•	•			•		
	Condicionadores de líquido industrial		•	•			•		
	Condicionadores de hidrocarburos		•	•			•		
	Apertura y explotación de canteras		•	•				•	
	Relleno de canteras o excavaciones		•	•				•	
OTROS	Campesias		•	•				•	
	Acceso gestual		•	•			•		•
	Transporte roles de comunicaciones		•	•		•		•	

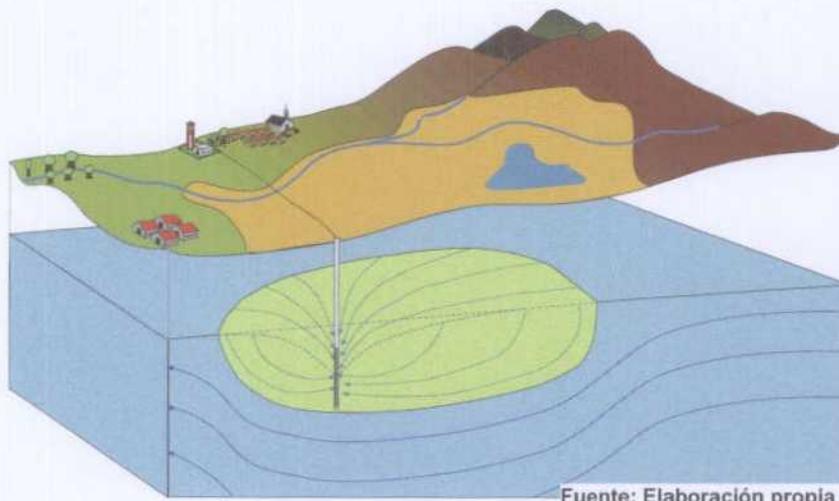
* El proyecto de actividades debe incluir un informe técnico sobre las condiciones que debe cumplir para no alterar la calidad existente del agua subterránea.

Fuente: Martínez Navarrete y García García, 2003

En el caso de los recursos hidrominerales de la Comunidad Autónoma de Galicia existe una relación definida de actividades prohibidas o condicionadas en el ámbito del perímetro de protección como se detalló en el apartado 1.2. Protección cuantitativa de captaciones de agua subterránea.

La protección de la cantidad ha sido abordada en gran parte de los estudios de perímetros de protección para captaciones de agua destinada al consumo humano que la contemplan efectuados en España (Martínez Navarrete y López Geta, 2001) definiéndose una "zona de protección de la cantidad", con el fin de preservar los caudales que realmente son empleados para proporcionar el suministro de agua a la población.

En los recursos hidrotermales el objetivo es garantizar la protección del acuífero en cantidad que garantice su normal aprovechamiento en la forma, condiciones y tiempo que fije la resolución administrativa de la concesión efectuando los oportunos expedientes de declaración y aprovechamiento.



Fuente: Elaboración propia

En esas zonas (figura 2-4), delimitadas con una metodología diferente a la empleada para la calidad se indicarán las limitaciones que se proponen a otras extracciones en un área en el entorno de la captación para

Figura 2-4: Zonas de protección de la cantidad.

proteger el recurso hídrico en cantidad considerando otros usos en el acuífero para garantizar esos caudales, empleándose normalmente como fundamentos el descenso del nivel piezométrico, criterios hidrogeológicos con elaboración de balances de entrada y salida y frecuentemente una combinación de ambos.

2.2. Perímetros de protección de captaciones de recursos hidrominerales. Particularidades en su delimitación

La metodología que se propone aplicar para la delimitación de perímetros de protección de captaciones de recursos hidrominerales se sintetiza en la tabla 2-3.

Contempla la salvaguarda del recurso respecto a la cantidad (caudal explotado), temperatura (en las aguas termales) y calidad para los diferentes medios (con porosidad intergranular, kársticos y fisurados).

La protección del caudal será analizada en el apartado 2.10, detallándose los métodos (hidrogeológicos, analíticos y modelos matemáticos) aplicables, que estarán muy condicionados por la información hidrogeológica disponible o que se puede obtener en el desarrollo de los estudios a efectuar, los diferentes usos existentes en el acuífero, así como por la proporción que supongan los recursos hidrominerales explotados respecto a los recursos totales del acuífero.

La salvaguarda de la temperatura en las aguas termales está determinada por la regulación de otras extracciones por captaciones en la zona de flujo ascendente así como por obras civiles que pudieran afectar a dicho flujo.

El tercer aspecto a considerar es la preservación de la calidad de las aguas. La metodología propuesta para ello depende del tiempo de residencia de las aguas. Así, en aquellas aguas con tiempos de residencia muy elevados (centenares a miles de años) la contaminación se podría producir solamente en el tramo final de su recorrido, cuando se produce el flujo ascendente en el entorno de la surgencia o hacia la captación (figura 2-5). Por ello podría considerarse suficiente con establecer las restricciones contempladas habitualmente en superficie en la zona de restricciones máximas, vallándola y limitando en ella todo tipo de actividades, restringiendo su uso al personal encargado de la explotación, en el caso de manantiales, así como garantizando que las características constructivas del pozo o sondeo que las capta sean las adecuadas.

Los problemas derivados de un inadecuado diseño de dichas captaciones, o de deterioros producidos en las mismas, se ilustran en las figuras 2-6 y 2-7 reflejándose un ejemplo de cómo solucionar dichas deficiencias en la figura 2-8.

La prudencia aconseja no obstante que además de las anteriores medidas se proteja el recurso regulando las actividades potencialmente contaminantes estableciendo las zonas de restricciones medias y mínimas. Éstas afectarán únicamente a los materiales existentes en la zona de descarga. Su objetivo es evitar que una eventual contaminación afecte al flujo de agua subterránea con tiempo de residencia corto hacia la zona de descarga de surgencias o de sondeos.

Es el caso, por ejemplo, de una contaminación en un acuífero superficial (figura 2-5) que podría afectar al recurso explotado si se produjese algún deterioro imprevisto en la captación o en el tramo final de surgencia en el caso de manantiales.

Perímetros de protección de recursos hidrominerales
 Deben protegerse ante tres tipos de afecciones
 Termal: Caudal, Temperatura, Calidad
 Todas: Caudal, Calidad

<p>A- Caudal. Perímetro de Protección de la Cantidad Aproximación secuencial según la información disponible y los usos existentes en el acuífero Evaluación de los recursos hidrominerales respecto a la recarga y descarga total del acuífero captado Métodos hidrogeológicos Métodos analíticos Modelos matemáticos Metodología detallada en el Apartado 2.10.</p>				
<p>B- Temperatura Muy relacionado con la protección del caudal. Disminución de la temperatura en las aguas termales en la zona ascendente (de descarga). Cambios de flujo debidos a otras captaciones, obras civiles...</p>	<p>C1. <u>Aguas con tiempo de residencia muy elevado</u> (centenares-miles de años). Son aguas muy antiguas, profundas. La contaminación se podría producir sólo en el tramo ascendente</p>	<p>C1.1. Proteger la captación (sondeo, manantial) en superficie. Zona de restricciones máximas</p> <p>C1.2. Características constructivas de la captación adecuadas</p> <p>C1.3. Proteger los materiales existentes en la zona de descarga, restringiendo actividades mediante el perímetro de protección</p>	<p>C1.3.1. Analizar si es un medio asimilable a un medio con porosidad intergranular a escala de la captación (Metodología detallada en el apartado 2.6)</p> <p>C1.3.2. Delimitar el perímetro de protección para limitar las actividades contaminantes que pudiesen afectar al flujo ascendente hacia la captación. Zonas de restricciones medias y mínimas Métodos (ver C2.3.2)</p>	<p>C2.1. Proteger la captación (sondeo, manantial) en superficie. Zona de restricciones máximas</p> <p>C2.2. Características constructivas de la captación adecuadas</p>
<p>C- Calidad</p>	<p>C2. <u>Aguas con tiempo de residencia "normal"</u> (algún año).</p>	<p>C2.3. Proteger las áreas de recarga, de flujo en el acuífero y de descarga</p>	<p>C2.3.1. Analizar si es un medio asimilable a un medio con porosidad intergranular a escala de la captación</p> <p>C2.3.2. Delimitar perímetros de protección en áreas de recarga, flujo en el acuífero y de descarga: - Zona de restricciones medias - Zona de restricciones mínimas</p>	<p>C2.3.2.1. Medios con porosidad intergranular. Métodos: - Analíticos - Modelos matemáticos - Hidrogeológicos y trazadores</p> <p>C2.3.2.2. Medios fisurados. Métodos: - Vulnerabilidad - Hidrogeológicos y trazadores - Modelos matemáticos específicos - Probabilísticos</p> <p>C2.3.2.3. Medios kársticos. Métodos: - Vulnerabilidad - Hidrogeológicos y trazadores - Modelos matemáticos específicos - Probabilístico (Metodología detallada en los apartados 2.5 a 2.9)</p>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-3: Metodología para la delimitación de perímetros de protección de recursos hidrominerales

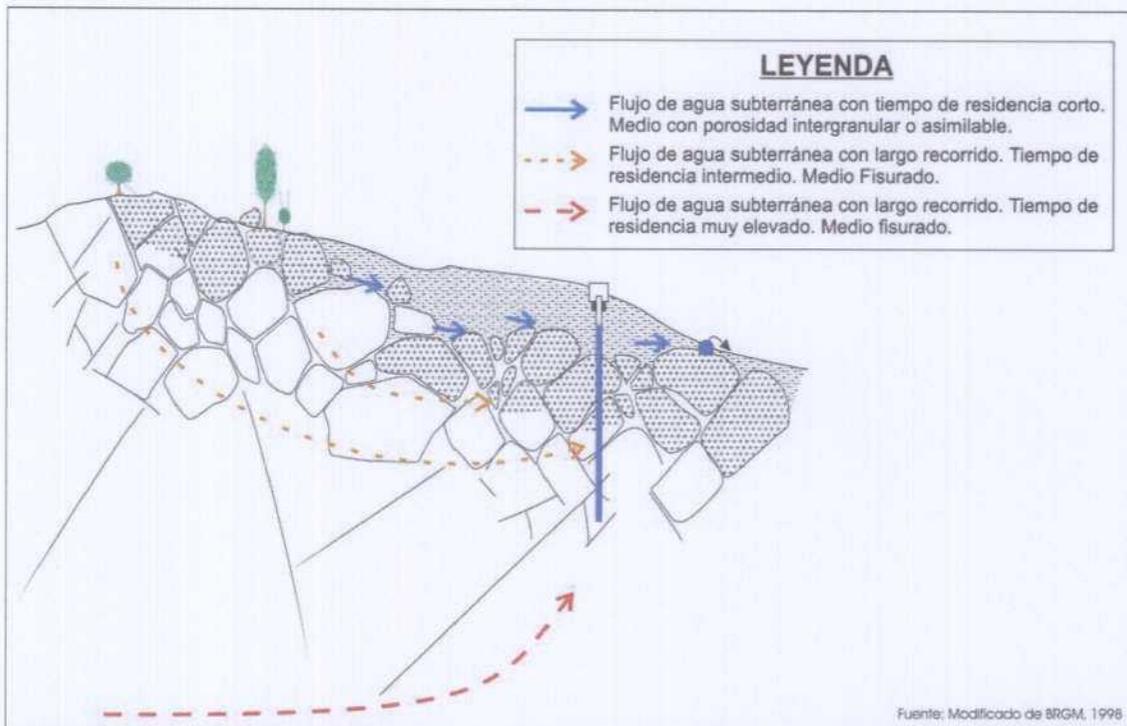


Figura 2-5: Flujos de agua subterránea a considerar en la protección de captaciones en medios fisurados.

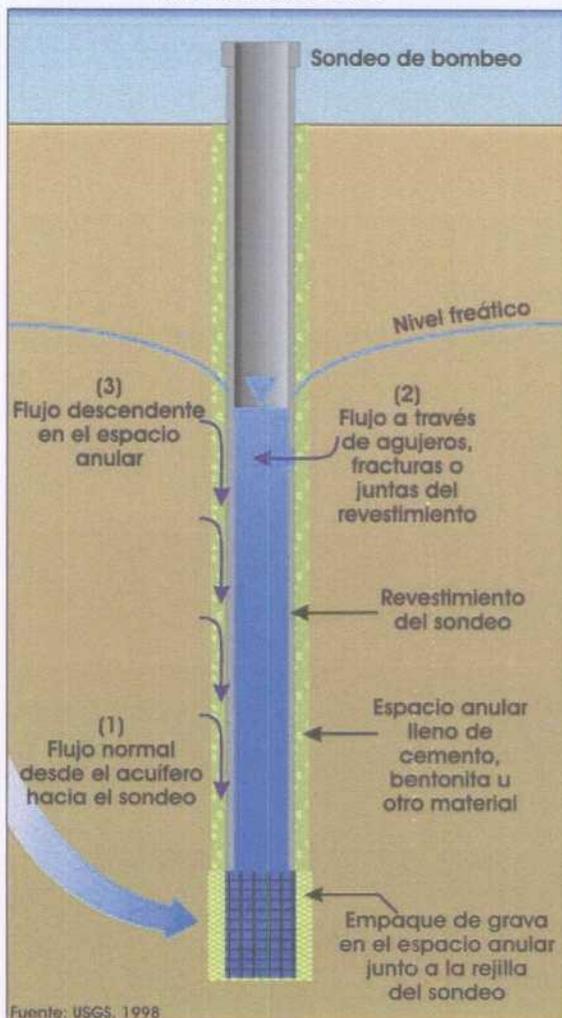


Figura 2-6: Problemas derivados de un inadecuado diseño y ejecución de una captación.

Los métodos aplicables para la delimitación dependerán en primer lugar de si el acuífero contemplado en esa zona es asimilable a un medio con porosidad intergranular, como se detallará en el apartado 2.6, o si es un medio kárstico o fisurado.

En aquellas aguas con un tiempo de residencia mucho menor (algún año), el riesgo de contaminación por actividades antrópicas es muy superior. En estos casos, además del establecimiento de una zona de restricciones máximas y de asegurar que las características constructivas de la captación son adecuadas estableciéndolas de modo similar a lo indicado previamente, es necesario proteger expresamente el área de recarga, de flujo en el acuífero y de descarga.

Para ello debe analizarse también en primer lugar si el medio a proteger se comporta como un medio con porosidad intergranular a la escala de la captación.

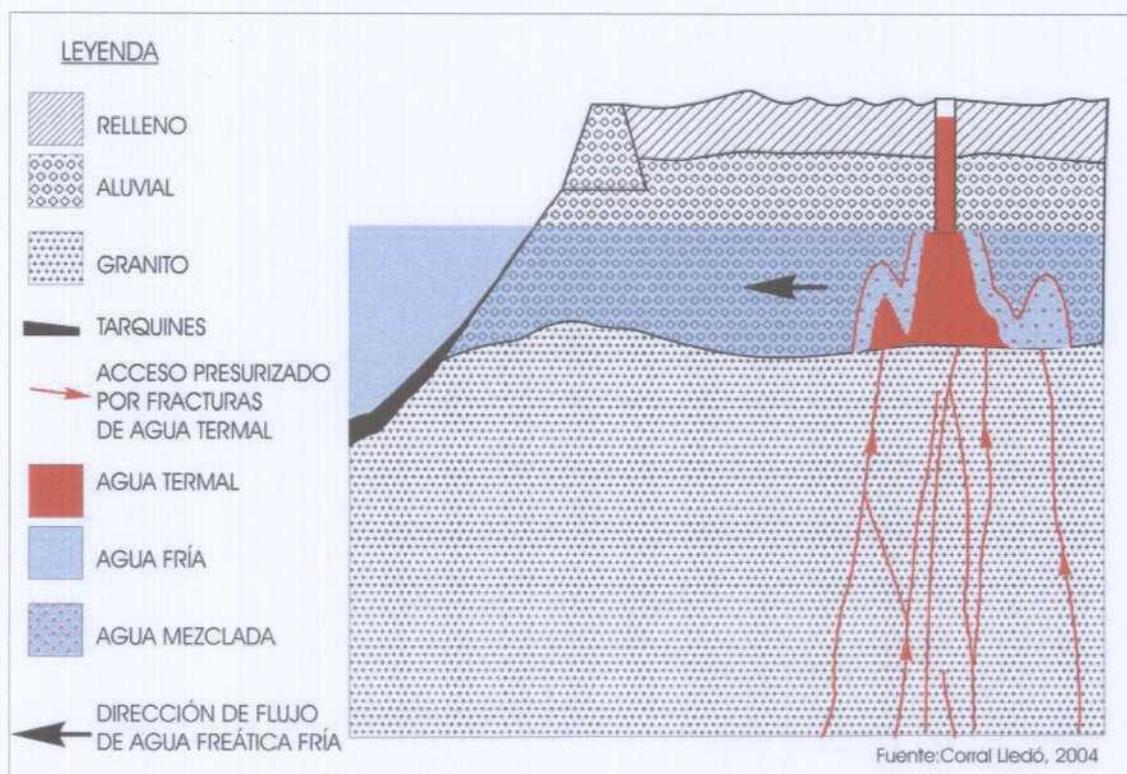


Figura 2-7: Ejemplo de problemas derivados de un inadecuado diseño y ejecución de una captación.

En el caso de medios con porosidad intergranular pueden aplicarse métodos analíticos, modelos matemáticos de flujo y transporte de solutos, así como métodos hidrogeológicos complementados con el empleo de trazadores.

En los medios fisurados y kársticos pueden emplearse métodos hidrogeológicos y de trazadores, modelos matemáticos específicos para estos medios, métodos probabilísticos y métodos de evaluación de la vulnerabilidad. En este último grupo, especialmente adecuado a las características de dichos acuíferos, además de los criterios de evaluación de vulnerabilidad genéricos es recomendable aplicar los métodos específicamente desarrollados para sus características.

En los apartados 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9 se describen las principales características de los métodos anteriormente mencionados.

Uno de los objetivos fundamentales de este estudio sería definir cuales son los más adecuados a las características de los recursos hidrominerales de la Comunidad Autónoma de Galicia. Para ello se prevé su aplicación y comparación de los resultados obtenidos en unas zonas piloto para establecer recomendaciones con vistas a su uso generalizado en esta Comunidad como se detalla en el apartado 3 de este informe.

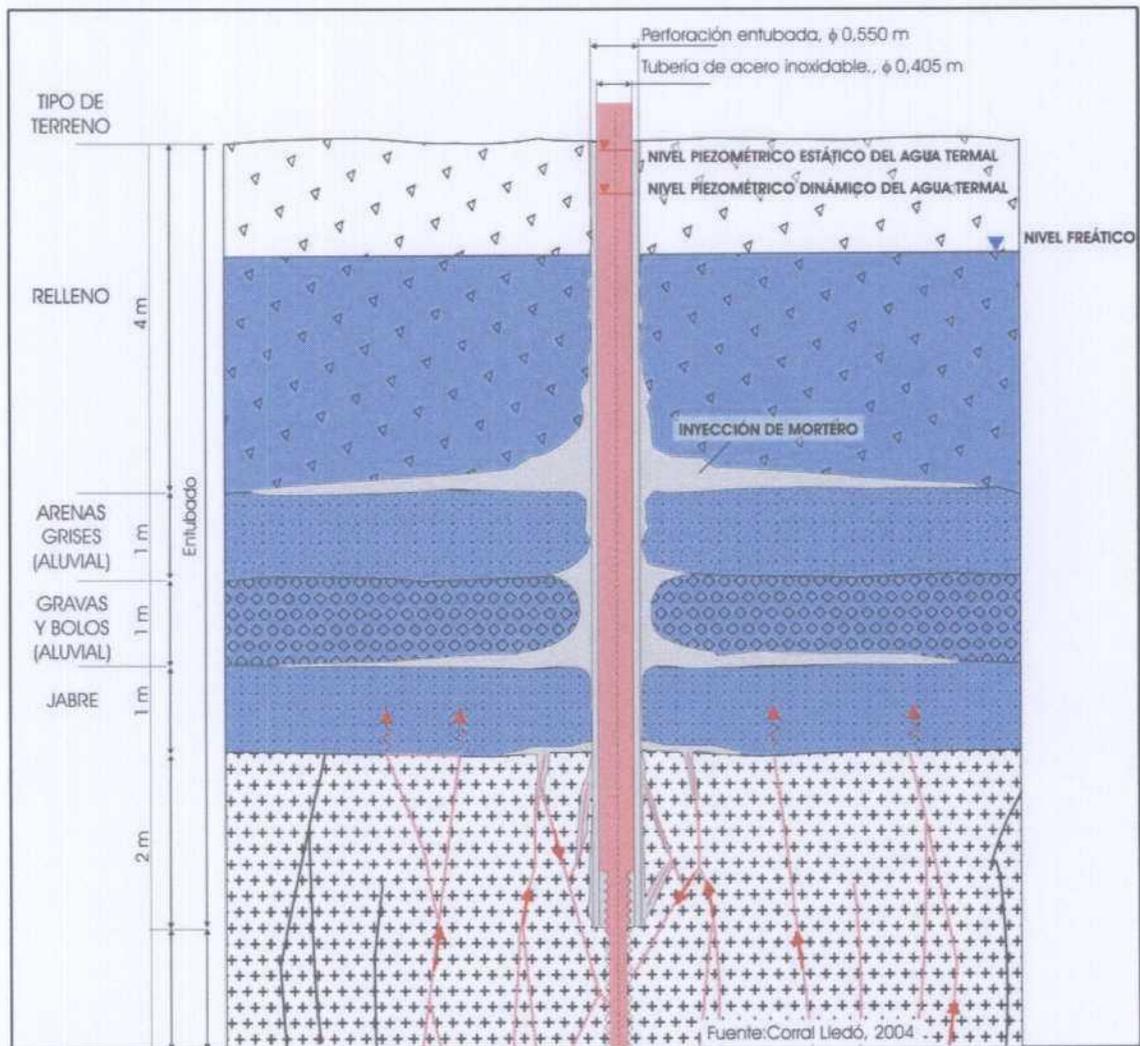
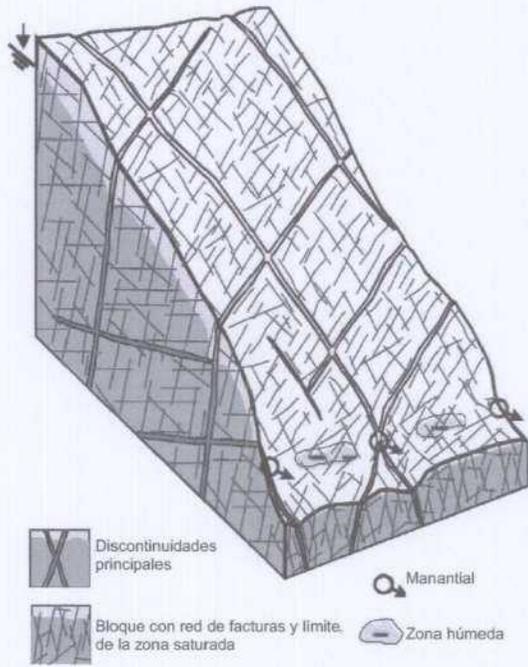


Figura 2-8: Ejemplo de diseño adecuado de una captación.

2.3. Características específicas de los medios fisurados



Fuente: OFEFP, 2003

Figura 2-9: Esquema conceptual de un acuífero fisurado.

En el caso de la Comunidad Autónoma de Galicia la mayoría de los recursos hidrominerales existentes se encuentran relacionados con medios acuíferos de tipo fisurado, por lo que resulta imprescindible analizar las características fundamentales de este tipo de medios.

De manera general el funcionamiento de los acuíferos fisurados obedece a un modelo conceptual en el que de manera ideal es posible diferenciar:

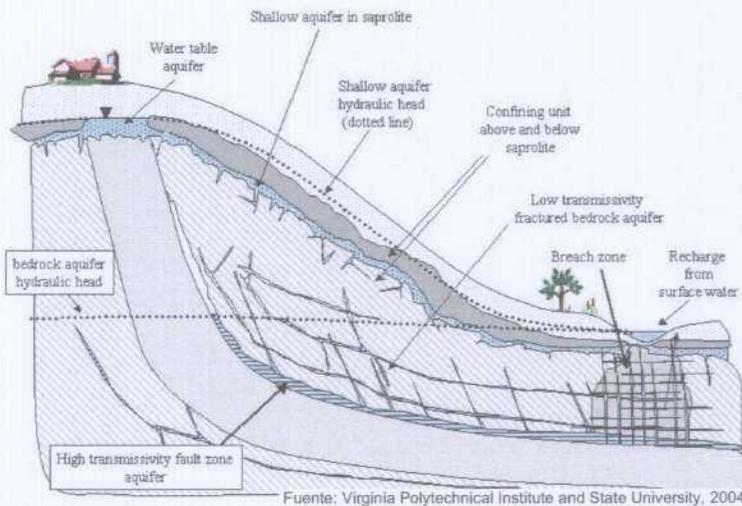
- Presencia de una red de discontinuidades principales de elevada conductividad hidráulica y cuya función es la de conducción del agua hacia las salidas principales del sistema y la alimentación de éstas.

- Resto del macizo rocoso relativamente homogéneo y con

una conductividad hidráulica mucho menor.

- La recarga del sistema se produce tanto a través de las discontinuidades como de las rocas menos permeables.

- El agua en las salidas del sistema corresponde a una mezcla de agua joven, ligada a las estructuras de mayor conductividad hidráulica que se encuentran directamente conectadas a la captación, y agua de más edad procedente de una alimentación en zonas menos permeables, que son drenadas más despacio y por tanto con un tiempo de tránsito mayor.



Fuente: Virginia Polytechnical Institute and State University, 2004

Figura 2-10: Modelo conceptual de funcionamiento de un acuífero fisurado

El funcionamiento general de los acuíferos fisurados queda condicionado en base a diferentes características propias del sistema. Estas son:

- La variabilidad litológica, que puede condicionar la existencia o no de planos de

estratificación, la posibilidad de aparición de porosidad por fracturas y/o intergranular, la existencia de minerales alterables y el diferente comportamiento mecánico de la roca, rígido o plástico.

- La tectónica, deformaciones e intensidad de éstas que ha sufrido la roca a lo largo de la historia geológica, la distribución y agrupación en diferentes familias de las discontinuidades en el conjunto del sistema, y el tipo de deformación, dúctil o frágil, que haya sufrido la roca.
- El relieve de la zona en la que se localiza el sistema acuífero, que puede condicionar la distribución de los potenciales hidráulicos así como la disolución de los minerales y la erosión mecánica de los materiales acuíferos o sus coberturas condicionando también la ruptura de rocas duras y la apertura de las fracturas.
- La relación del sistema con las aguas superficiales, ya que en caso de haber una comunicación con cursos de agua superficiales la influencia de estos en las aguas subterráneas generalmente será mayor y más rápida que en el caso de acuíferos de porosidad intergranular.

La delimitación de perímetros de protección en medios fracturados requiere en primer lugar evaluar si el medio se comporta hidráulicamente de un modo asimilable a un acuífero con porosidad intergranular a la escala de los perímetros de protección (con flujo laminar, homogeneidad del medio y aplicabilidad de la ley de Darcy a la escala del problema entre otros factores) como se analizará en el apartado 2.4. Si es asimilable se aplicará la misma metodología y zonación definidas para los perímetros de protección en estos medios (apartado 2.6, tabla 2-5). En el caso de no poder asimilarlo es necesario utilizar una metodología específica que contemple adecuadamente aspectos como heterogeneidad, anisotropía, flujo rápido y turbulento, las limitaciones respecto a la aplicabilidad de la ley de Darcy por el régimen turbulento y sus repercusiones en la zonación correspondiente.

En las figuras 2-11 y 2-12 se esquematizan algunos aspectos que deben contemplarse en la delimitación de perímetros de protección en medios fisurados que implican modificación en las líneas de flujo respecto a las que se producirían en un medio con porosidad intergranular o asimilable al mismo.

En los acuíferos fracturados la conductividad hidráulica y la velocidad del agua pueden diferir en varios órdenes de magnitud

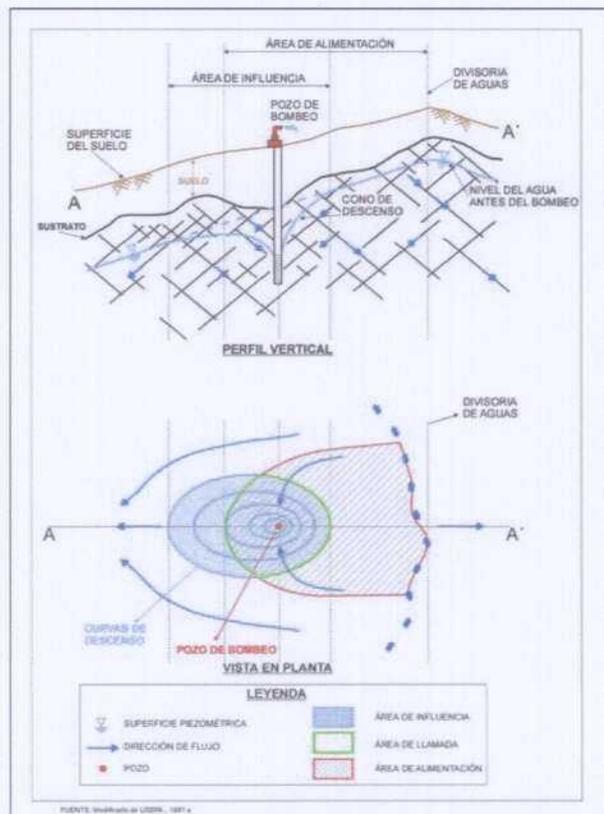


Figura 2-11: Perímetros de protección en medios fisurados. Área de alimentación y de influencia.

dependiendo de la dirección, en función de su anisotropía.

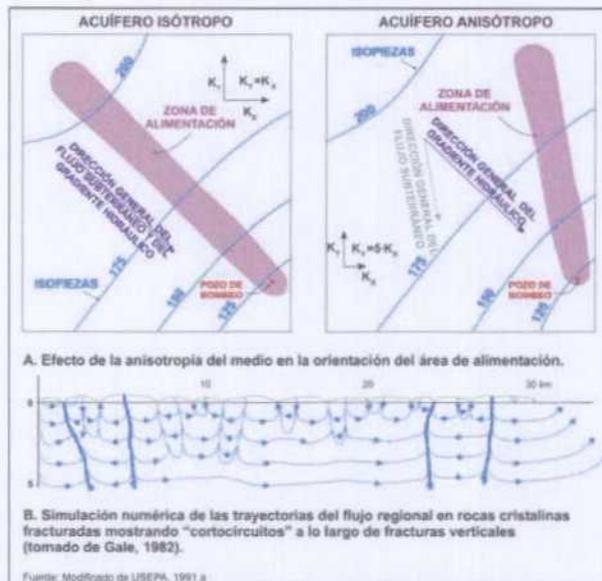


Figura 2-12: Efectos de la anisotropía en un acuífero en medios fisurados.

2.4. Evaluar si el acuífero captado se comporta como un medio con porosidad intergranular o asimilable a la escala de la captación

La evaluación del comportamiento de un acuífero para determinar si este es asimilable al de un acuífero con porosidad intergranular a la escala del perímetro de protección y su grado de heterogeneidad requiere del análisis, lo más detallado posible de un importante número de datos. Entre ellos se pueden diferenciar “estudios estándar” realizados de forma común en cualquier trabajo de delimitación de un perímetro de protección y “estudios específicos” para la delimitación de éstos en acuíferos fisurados.

A continuación se expone un listado de los diferentes datos que es necesario considerar.

⇒ “Estudios estándar”:

- Cartografía geológica. Fracturación.
- Cartografía hidrogeológica:
 - Regional.
 - Cartografía de detalle del entorno de las captaciones a proteger:
 - ★ Inventario detallado de puntos de agua: características, niveles, distribución de conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento.
 - ★ Isopiezas de detalle en diferentes épocas.
 - ★ Cursos fluviales, aforos diferenciales.
 - ★ Zonas de infiltración preferencial.
 - ★ Análisis del tipo de red de drenaje.
- Cartografía geomorfológica: suelos y recubrimiento
 - Tipo.
 - Características de conductividad hidráulica: ensayos de infiltración de doble anillo...
 - Espesor: calicatas, afloramientos, columnas litológicas, sondeos....
- Ordenación del territorio en el entorno de la captación a proteger.
- Inventario y análisis de las principales características de los focos potenciales de contaminación:
 - Agrícolas
 - Ganaderos.
 - Industriales.
 - Urbanos.
- Evaluación de la cuenca de alimentación:
 - Infiltración = (Precipitación – ETR – Escorrentía);
 - Superficie = (Caudal anual capt. / Infiltración);

- Adaptación de la superficie obtenida de la cuenca de alimentación mediante la consideración de la topografía, la geología, la hidrogeología, otras surgencias, y el flujo hacia sistemas profundos.
 - Características de la captación: situación tipo, estado, caudal, depósitos, conducciones.
- ⇒ “Estudios específicos”:
- Ensayos de bombeo en pozos/sondeos (pozos de bombeo, piezómetros de observación).
 - Ensayos de bombeo escalonados de 1h con sucesivos incrementos de Q: medida de niveles en el pozo de bombeo.
 - Ensayos de bombeo escalonados con incrementos de Q: medida de niveles en piezómetros.
 - Isolíneas del cono de bombeo en piezómetros.
 - Datación:
 - Tritio.
 - Otros.
 - En manantiales, evolución en el tiempo especialmente en eventos de crecida:
 - Pluviometría de estaciones cercanas.
 - Caudal: al menos 10 medidas anuales (Ej.: 1 al mes y otras adicionales tras fuertes precipitaciones).
 - Temperatura: al menos 10 medidas anuales (ídem).
 - Conductividad: al menos 10 medidas anuales (ídem).
 - Turbidez.
 - Dureza total.
 - Análisis bacteriológicos: más de 3 medidas, especialmente tras las precipitaciones.
 - Calidad química.
 - Evaluación de discontinuidades.
 - Escala regional.
 - Escala local: extensión, espaciado medio, abertura, orientación, colmatación.
 - Ensayos de trazadores:
 - Evaluar velocidad de tránsito en el acuífero, comprobar si el tiempo de tránsito aumenta con el alejamiento a la captación.
 - Verificar las zonas de infiltración preferencial.
 - Verificar la heterogeneidad del acuífero.

Para determinar si un medio fracturado se comporta como un medio con porosidad intergranular hay que analizar los siguientes aspectos (USEPA, 1991).

Interpretación de ensayos de bombeo

Los tres aspectos a evaluar son:

1. Los descensos en los pozos de observación que se incrementan linealmente con aumentos escalonados en el caudal en el pozo de bombeo son característicos de medios equivalentes a acuíferos con porosidad intergranular (Figura 2-13 A). Son necesarios al menos tres aumentos de caudal con intervalos de bombeo similares para su evaluación.

2. Las gráficas de descensos/tiempo de pozos para diferentes caudales presentarán forma "de curva continua" sin inflexiones en los medios asimilables a porosidad intergranular (Figura 2-13 B).

3. Las isolíneas que definen el cono de bombeo son circulares o elípticas en medios equivalentes a acuíferos con porosidad intergranular (Figura 2-13 C).

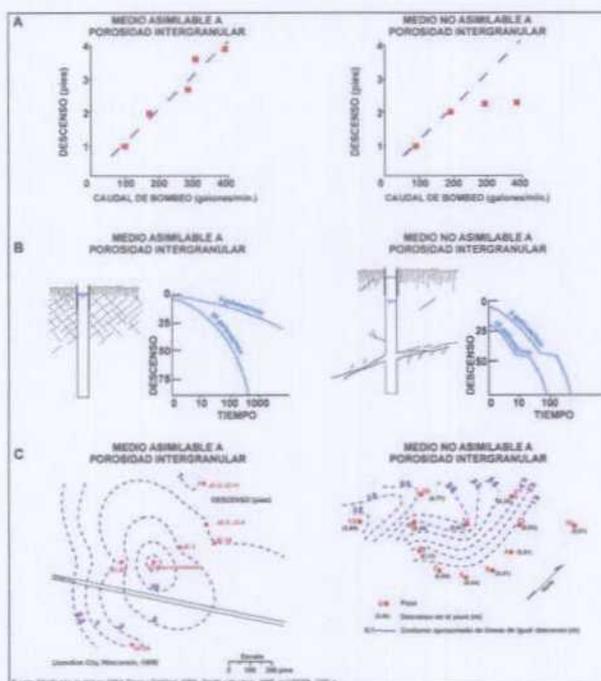


Figura 2-13: Ensayos de bombeo como criterio para evaluar si el acuífero es asimilable a un medio con porosidad intergranular.

Superficie del nivel piezométrico

En los acuíferos fracturados asimilables a medios con porosidad intergranular las isopiezas son continuas y de formas suavizadas, sin áreas con cambios rápidos de nivel o niveles anómalos. Las formas escalonadas son características de medios con fracturas espaciadas, grandes contrastes en los valores de conductividad hidráulica entre bloques y fracturas, no asimilables a acuíferos con porosidad intergranular.

Es necesario analizar los gradientes hidráulicos verticales ya que en sistemas fuertemente fracturados es muy frecuente que el nivel piezométrico varíe significativamente con la profundidad, debiéndose registrar a lo largo del tiempo en diferentes estaciones para detectar cambios.

Proporción de la fracturación respecto a la escala del perímetro

Los acuíferos equivalentes a medios con porosidad intergranular presentan fracturas verticales y horizontales a escala de afloramiento numerosas y de escala mucho menor que la del ámbito del perímetro de protección. La dimensión mínima del perímetro de protección debería ser al menos cien veces el espaciado medio de la fracturación.

Distribución de la conductividad hidráulica

En medios asimilables a porosidad intergranular la distribución de la conductividad hidráulica debería ser aproximadamente log normal, mientras que en aquellos medios donde su distribución sea fuertemente bimodal no será posible asimilarlos.

Variaciones en la hidrogeoquímica

En acuíferos fracturados no asimilables a medios con porosidad intergranular pueden existir grandes variaciones de un punto a otro del acuífero, así como en el tiempo.

El agua que se mueve por conductos normalmente tiene menos tiempo de contacto con mineralizaciones y un total de sólidos disueltos menor, así como un índice de saturación mineral más bajo que la que circula en acuíferos con porosidad intergranular con mineralogía similar.

En acuíferos asimilables a porosidad intergranular tiene normalmente valores de temperatura y de composición química relativamente uniforme en el tiempo y en diferentes lugares del acuífero (figura 2-14).

Los valores altos de turbidez y de bacterias son más frecuentes en acuíferos con flujo por conductos. En general una captación que nunca tenga valores significativos de éstos posiblemente no esté conectada a conductos importantes.

En el caso de España no existen consideraciones específicas para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos fisurados en la legislación aplicable, aunque han sido recogidos en diversos trabajos, dándoles un tratamiento semejante al propuesto para acuíferos kársticos (Moreno Merino *et al.*, 1991).

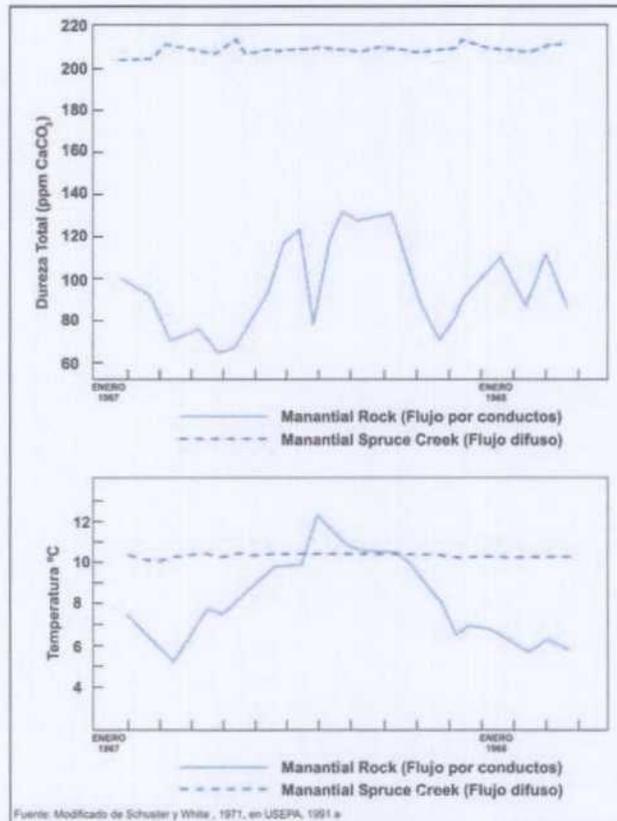


Figura 2-14: Variaciones en la dureza y temperatura como criterio para evaluar si el acuífero es asimilable a un medio con porosidad intergranular (flujo difuso).

2.5. Métodos hidrogeológicos y trazadores

La delimitación de perímetros de protección empleando métodos hidrogeológicos complementados con el empleo de trazadores para definir los límites del acuífero y del área de alimentación de la captación se basa en el empleo de :

- Cartografía hidrogeológica.
- Análisis estructural.
- Análisis hidroquímico.
- Análisis de las isopiezas y de las direcciones de flujo.
- Relación entre el acuífero y los cursos de agua superficiales.
- Testificación hidráulica en secciones aisladas (con la utilización de packers).
- Testificación geofísica.
- Aforos de ríos y manantiales.
- Ensayos de trazadores y datación de las aguas por diversos métodos.
- Otras técnicas.

La aplicación de estos métodos permite establecer el área de alimentación de cada captación, es decir una única zona, por lo que no se proporcionan criterios para la subdivisión del perímetro de protección en diferentes zonas, como si posibilitan los métodos que consideran otros criterios como el tiempo de tránsito.

Hay que destacar que el análisis hidrogeológico de detalle del acuífero captado es, en todo caso, imprescindible para definición de la geometría del acuífero, sus límites, modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico e identificación de flujos regionales (figuras 2-15, 2-16, 2-17 y 2-18) también es básico para la obtención de diversos parámetros requeridos para los demás

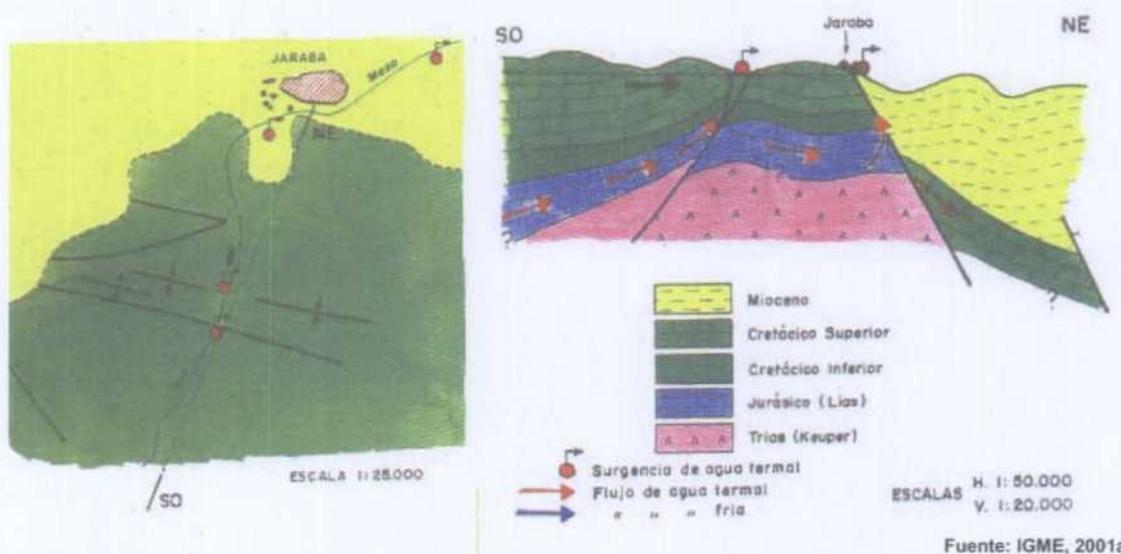


Figura 2-15: Empleo de criterios hidrogeológicos para definir el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero, su geometría y flujos preferentes. Agua termal de Jaraba.

métodos, y como complemento a los mismos para definir los perímetros de protección.

Si bien no cabe en este apartado detallar los fundamentos de las técnicas empleadas, anteriormente enumeradas, objeto de diversas publicaciones, es importante reseñar que la complejidad del flujo en medios fisurados requiere en muchas ocasiones la testificación hidráulica de diferentes secciones aisladas mediante packers, para definir con precisión la dirección y sentido del flujo frecuentemente compleja incluso a escala local (figura 2-19).

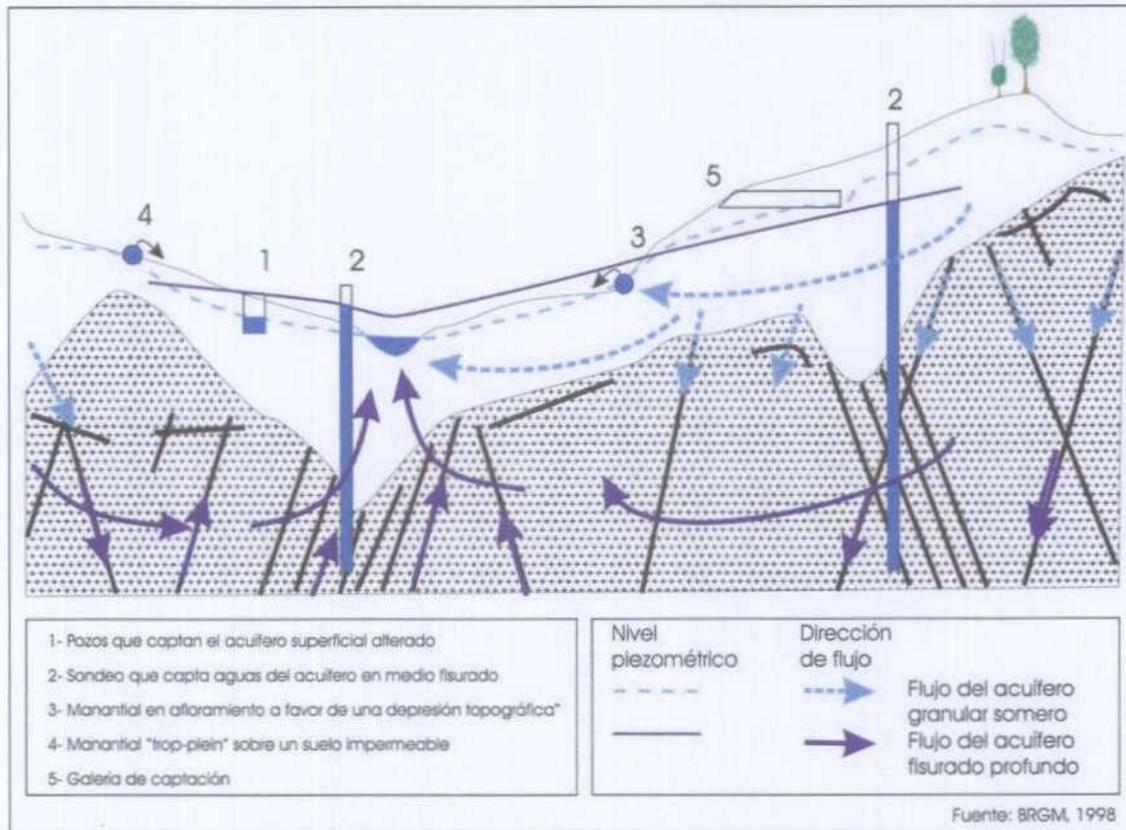


Figura 2-19: Testificación hidráulica en secciones en medios fisurados.

Por otra parte también hay que resaltar que los ensayos de trazadores y la datación de las aguas son técnicas de gran utilidad para la delimitación de perímetros de protección especialmente en medios fisurados.

Los trazadores son herramientas fundamentales para descubrir y predecir la velocidad y trayectoria de dispersión de los contaminantes en el agua. Estos datos son esenciales para el desarrollo de estrategias de protección de captaciones y pueden ser esenciales para la calibración de modelos de flujo y movimiento de contaminantes. Económicamente se trata de un método rentable y muchas veces es el único apto para la obtención de los datos necesarios para planificar las zonas de los perímetros de protección del agua subterránea.

Los ensayos de trazadores se pueden llevar a cabo mediante introducción de los trazadores artificiales en el sistema que se está investigando o mediante la determinación de algún constituyente natural del agua u otras propiedades de ésta, utilizando trazadores "naturales".

Trazadores artificiales

Es el método más extendido y antiguo de trazado. Consiste en la introducción de una sustancia en el sistema hídrico que pueda ser identificada y reconocida en otro lugar.

No existe el trazador ideal, la mayor parte son algo reactivos (con el suelo, la roca o el agua) y pueden sufrir reacciones de sorción o de intercambio iónico al igual que los contaminantes. Además las velocidades de flujo de los trazadores no son necesariamente las mismas que las de los contaminantes, en flujo difuso suelen ser mayores las de los trazadores y en flujo a través de conductos o fracturas la diferencia es menor.

Trazadores naturales

El grupo más importante de los trazadores naturales son los constituyentes químicos del agua, así como su contenido isotópico, aunque los trazadores "no intencionados", introducidos en el medio por el hombre, se incluyen también en esta categoría. De todos ellos se pueden obtener resultados importantes. Dentro de éstos se incluyen los focos de contaminación existentes.

Ensayos de trazado

Se puede realizar el ensayo de trazado con gran variedad de sustancias o materiales.

En general los colorantes (Figura 2-20) son los trazadores más utilizados por ser los más baratos y en conjunto eficaces debido a su solubilidad en el agua, destacando los fluorescentes como Fluoresceína, Eosina, Rodamina WT, Sulforodamina B y los abrillantadores ópticos C.I. 22 y 28, por ser más fácilmente reconocibles y por su menor adsorción.

Los trazadores fluorescentes representan una herramienta fundamental para la determinación de la dirección de flujo del agua subterránea, su movimiento y otras características, y por tanto para la delimitación de perímetros de protección, debido a su detectabilidad, inocuidad para el hombre y el medio ambiente y asequibilidad económica. Además el muestreo se puede realizar por adsorción en detectores pasivos.



Figura 2-20: Realización de ensayos de trazado mediante inyección de colorantes.

En general un ensayo de trazadores bien diseñado reducirá bastante el área de impactos potenciales, e indicará zonas en las que han de llevar a cabo medidas de protección. Para ello se ha de situar correctamente el punto de inyección, utilizar el trazador más adecuado en cantidad precisa, considerar los niveles de fondo existentes, situar detalladamente la toma de muestras continuada, muestrear las aguas superficiales, y planificar detalladamente la duración del ensayo, no debiéndose limitar a la primera aparición del trazador en un único punto. Es imprescindible la instrumentación analítica adecuada.

Una de las ventajas en el uso de colorantes fluorescentes es que proporcionan datos claros acerca de la dirección de flujo y del caudal de agua subterránea que fluye (velocidad de flujo), así como la identificación de los momentos de la primera aparición, picos de concentración o la curva de recuperación completa.

Se pueden realizar tres tipos de ensayos de trazado con colorantes:

- Trazado cualitativo.

Normalmente es suficiente para reconocer la conexión hidráulica entre dos puntos y se trata de la técnica más asequible económicamente. Se puede hacer mediante:

- Observación visual de la "pluma de colorante".
- Detección pasiva con "fluocaptoreos".

- Trazado semi-cuantitativo.

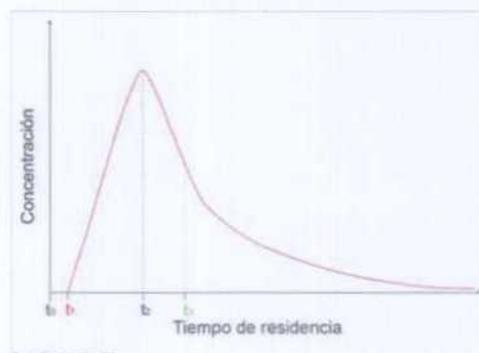
Mediante la utilización de detectores pasivos y análisis instrumental del colorante (fluorímetro de filtro, espectrofluorímetro).

- Trazado cuantitativo.

Utilizando análisis instrumental del agua en muestras puntuales o continuo con medida continua de la descarga (caudal). Permite una mejor determinación de la velocidad de flujo, curvas características de llegada del trazador y su retardo, dispersividad del acuífero y cálculo de la cantidad de trazador recuperado.

Cada uno de los tres tipos de ensayo es suficiente y satisfactorio para la determinación de la conexión hidráulica entre el punto de inyección y el de toma de muestras.

Los ensayos hay que hacerlos en condiciones de: flujo de base, flujo intermedio y flujo de inundación.



La interpretación de los ensayos con colorantes se lleva a cabo mediante las curvas de concentración-tiempo de llegada del trazador a los puntos de muestreo, o curvas de concentración (figura 2-21). En estas se puede interpretar los diferentes tiempos y concentraciones que se reflejan en la tabla 2-4.

Figura 2-21: Ensayo de trazadores. Curva de concentración-tiempo de residencia.

Tabla 2-4: Datos que se pueden calcular en un ensayo de trazadores con colorantes.

Tiempo	Concentración	Velocidad de flujo
T₀ Inyección	-	-
T₁ Primera detección	Límite de detección (c_E)	Velocidad máxima de flujo (v_{a1})
T₂ Concentración máxima	Concentración máxima (c_{max})	Velocidad de flujo dominante ($v_{a dom}$)
T₃ Tiempo de vida media	Carga media (c_m)	Velocidad de flujo (media) (v_a)
T₄ Última detección	Límite de detección (c_E)	-

2.6. Métodos en medios asimilables a porosidad intergranular

En los medios con porosidad intergranular, o en aquellos cuyo comportamiento hidráulico permita assimilarlos a éstos, medios relativamente homogéneos en que puede aplicarse la ley de Darcy, es en los que más métodos y con mayor precisión pueden aplicarse para delimitar perímetros de protección, ya que pueden utilizarse métodos hidrogeológicos, analíticos y modelos matemáticos. Los métodos hidrogeológicos son fundamentales, como se indicó en el apartado 2.5.

Los métodos analíticos emplean ecuaciones sencillas que requieren pocos datos (normalmente es necesario únicamente conocer el caudal de explotación de la captación, el gradiente hidráulico, la conductividad hidráulica, el espesor saturado y la porosidad eficaz) y permiten en su mayor parte considerar el tiempo de tránsito por lo que resultan muy fáciles de aplicar al establecer diferentes zonas.

El inconveniente de estos métodos es que efectúan una simplificación de las características hidrogeológicas del acuífero y de las condiciones de explotación siendo necesarias unas condiciones muy estrictas (pozos totalmente penetrantes, acuíferos de extensión infinita...) que pueden alejarse sensiblemente de la realidad, por lo que presentan un cierto error. Éste es reducido para las primeras zonas (restricciones absolutas y máximas calculadas normalmente mediante un tiempo de tránsito de 1 y 50 días respectivamente) y se incrementa para la zona más alejada (definida normalmente mediante un tiempo de tránsito de varios años).

Los modelos matemáticos, cuando se dispone de información suficiente para su ejecución y calibrado, permiten tener en cuenta variaciones en los principales parámetros hidráulicos, heterogeneidad del acuífero, influencias de bombeos y otros factores, por lo que ofrecen resultados más precisos especialmente en la delimitación de la zona de restricciones moderadas y sobre todo cuanto mayor sea el tiempo de tránsito empleado que en esta zona varía de 1 a 25 años.

Las principales características de los métodos aplicables se sintetizan en la tabla 2-5. Estas características junto con el análisis comparativo de los resultados obtenidos al aplicar cada uno de ellos en un acuífero con porosidad intergranular en la cuenca del río Duero ha sido objeto detallado de otras publicaciones (Martínez Navarrete y García García, 2003) y no serán reflejadas en este apartado.

F	depende del tiempo de tránsito.										acuífero. Isopiezas y dirección del flujo. Relación río acuífero		
P	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable. Pozo con alta capacidad de bombeo		i	K		m_e				V_e	Isopiezas y dirección de flujo. Divisorias hidrogeológicas	Delimita el área de alimentación mediante el análisis de isopiezas y divisorias hidrogeológicas. Se obtiene la distancia aguas arriba para diferentes tiempos de tránsito a medir como un radio dentro del área de alimentación	Radio que define la zona de correspondiente a diferentes
P	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable. Pozo con alta capacidad de bombeo	Q			b	m_e						Delimita el área de cilindro de acuífero necesario para proporcionar el caudal bombeado considerando que procede del agua almacenada, definida por el volumen del cilindro y la porosidad eficaz, considerando la recarga despreciable	Radio de un cilindro para que dentro de él tarde un tiempo alcanzar la captación, efectuando diferentes tiempos de tránsito
P	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable. Pozo con alta capacidad de bombeo. Proporciona un área única. Solo válida para valores de tiempo muy grandes	Q						N				Delimita el área necesaria para proporcionar el caudal bombeado para valores de tiempo muy grandes considerando que el agua procede exclusivamente de entradas al acuífero debidas a recarga	Radio del cilindro que define protección para valores de tiempo
P	Flujo bidimensional. Flujo ambiental despreciable	Q					S		T			Delimita la zona en la que se produce un descenso determinado del nivel piezométrico con el caudal bombeado empleando la ecuación de Theis para régimen transitorio.	Radio a la captación para el descenso determinado del nivel diferentes valores de tiempo
P	Acuífero homogéneo en las proximidades de la captación. Gradiente regional uniforme	Q	i	K	b	m_e				V_e	Isopiezas y dirección de flujo	Calcula la zona de llamada de la captación (hay descenso piezométrico y el flujo se dirige a la captación) y define posteriormente la distancia en la dirección de flujo correspondiente al tiempo de tránsito deseado	Ancho del frente de llamada. Ancho del frente de llamada a captación. Distancia aguas arriba del flujo para diferentes tiempos
P	Proporciona un área única para el perímetro de protección. Esta no depende del tiempo de tránsito. Flujo bidimensional. No considera el tiempo de tránsito.	Q	i	K	b						Isopiezas y dirección de flujo. Divisorias hidrogeológicas	Delimita la divisoria hidrogeológica mediante el análisis de las isopiezas y líneas de flujo. Emplea la ecuación de flujo uniforme para definir el ancho del área de alimentación en la divisoria hidrogeológica y su distancia aguas abajo	Área de alimentación de la captación ancho a la altura de la divisoria su distancia aguas abajo
P	Acuífero homogéneo en las proximidades de la captación. Gradiente regional uniforme	Q	i		b	m_e			T		Isopiezas y dirección de flujo	Se calcula mediante una fórmula un "tiempo reducido", buscándose en la colección de curvas de tiempo definidas por los autores sus puntos de corte con los ejes de ordenadas y se transforma mediante ecuaciones esa distancia gráfica a distancia en metros.	Distancia aguas arriba, distancia lateral a ambos lados de tránsito
P	Acuífero homogéneo en las proximidades de la captación	Q	i	K	b	m_e					Isopiezas y dirección de flujo	Ecuación que define el tiempo de tránsito necesario para que una partícula se mueva en la dirección del flujo desde un punto a una distancia conocida de la captación aguas arriba o aguas abajo hasta alcanzarla	Distancia aguas arriba y distancia para tiempos de tránsito determinados el método de tanteo empleando
P	Aplicable con valores de $x < 18$ aguas arriba y $x > -3,5$ y $m_e > 0,1$ (10%) aguas abajo (1)	Q	i	K	b	m_e					Isopiezas y dirección de flujo	Ecuaciones obtenidas mediante una solución empírica que minimiza las diferencias entre la fórmula de Bear y Jacob y los resultados obtenidos con el programa Visual Modflow para un tiempo de tránsito de 50 días	Distancia de una elipse aguas abajo, perpendicular a la dirección final redondeada de la elipse
P	Proporciona un área única para el perímetro de protección. Esta no depende del tiempo de tránsito.		i	K		m_e				V_e	Descripción litológica y longitud de recorrido de los diferentes materiales en la zona no saturada y en la zona saturada	Método empírico que cuantifica el poder depurador de los materiales en la zona no saturada y saturada ante efluentes contaminantes (sin especificar), que pudieran atravesarla, obteniendo los valores requeridos de tablas	Depuración en la zona no saturada que como mínimo es necesaria zona saturada para alcanzar
P	Considera la componente de advección del transporte de solutos pero no considera la difusión ni la dispersión	Límites hidrogeológicos del área a modelar. Condiciones de contorno (Recarga, celdas de nivel constante, características ríos y drenes). Capas (geometría y tipo de acuífero). Valores de piezometría Valores de parámetros hidráulicos en cada celda (k_x , K_y , K_z , S, m_e) caudal y régimen de bombeo en cada captación									Modflow es un modelo tridimensional en diferencias finitas que resuelve las ecuaciones que definen el flujo considerando valores de las propiedades del acuífero específicas en cada celda, y proporciona el potencial hidráulico del agua en las mismas para régimen permanente y transitorio. Modpath usa los resultados de flujo de Modflow y calcula el recorrido de partículas considerando la componente de advección en el transporte de solutos	Delimita con precisión el área del perímetro de protección para de tránsito en planta y perfil bajo hipótesis de bombeos	

Datos necesarios:
Q: Caudal bombeado
i: Gradiente hidráulico
K: Conductividad hidráulica
b: Espesor saturado
 m_e : Porosidad eficaz
S: Coeficiente de almacenamiento
N: Recarga
T: Transmisividad
 V_e : Velocidad eficaz

(1) Limitaciones al método de Krijgsman y Lobo Ferreira:

$$x = 2 \cdot K \cdot i \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot b \cdot t}{Q \cdot m_e}}$$

2.7. Métodos de vulnerabilidad. Fundamentos y datos requeridos

El concepto de vulnerabilidad de las aguas subterráneas, surgió en la década de 1960 (Albinet y Margat, 1970).

La cartografía de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación tiene como objetivo la subdivisión gráfica del área en clases o categorías basándose en la suposición de que el medio físico puede propiciar cierto grado de protección, con respecto a los potenciales contaminantes introducidos en el medio subterráneo.

La vulnerabilidad no es un parámetro de medida directa pero se puede determinar utilizando diversos datos, especialmente geológicos e hidrogeológicos.

A lo largo del tiempo el concepto ha evolucionado con la inclusión de diferentes factores (cobertura de protección, potencial de depuración del agua en el acuífero, condiciones de flujo subterráneo, condiciones climáticas y riesgos de contaminación por el tipo de uso y ocupación del suelo).

Generalmente la cartografía de vulnerabilidad se realiza en función de cinco clases (muy alta, alta, moderada, baja y muy baja) como se refleja en la tabla 2-6.

Tabla 2-6: Significado práctico de las clases relativas de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos

CLASES	DEFINICIÓN
Muy Alta	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes del agua con impacto bastante rápido en muchas situaciones de contaminación
Alta	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto los adsorbidos o rápidamente transformados), en muchas situaciones de contaminación
Moderada	Vulnerable a algunos contaminantes pero sólo cuando se vierten o se lixivian
Baja	Sólo vulnerable a contaminantes persistentes a largo plazo y cuando éstos se vierten o lixivian de forma continua y dispersa
Muy Baja	Presencia de lechos confinados sin ningún flujo subterráneo significativo

En la actualidad en el seno la Unión Europea, la Acción COST 620 “*Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*” diferencia vulnerabilidad intrínseca y específica (Daly *et al.*, 2002 en Andreo *et al.*, 2002), definiéndolas de la siguiente manera:

- *Vulnerabilidad intrínseca*: susceptibilidad del agua subterránea a la contaminación generada por la actividad humana en función de las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de un área pero independientemente de la naturaleza de los contaminantes.
- *Vulnerabilidad específica*: susceptibilidad del agua subterránea a un contaminante o grupo de contaminantes concreto en función de las características de éstos y sus relaciones con los componentes de la vulnerabilidad intrínseca.

En la actualidad la cartografía de vulnerabilidad intrínseca es un instrumento de aplicación imprescindible para la delimitación de perímetros de protección en los medios kársticos y fisurados que no puedan ser asimilados a un medio con porosidad intergranular. Por ello es necesario tenerla en cuenta en el caso de la protección de los recursos hidrominerales de la Comunidad Autónoma de Galicia, al estar en su mayor parte asociados a medios fisurados.

A continuación se enumeran diferentes métodos existentes aplicables a distintos medios y específicos para acuíferos fisurados.

Métodos aplicables en diversos medios

2.7.1. Método PI

Desarrollado en el Departamento de Geología Aplicada de la Universidad de Karlsruhe, Alemania, (Goldscheider *et al.*, 2000), para la cartografía de la vulnerabilidad en todo tipo de acuíferos pero especialmente en los acuíferos con flujo por conductos (kársticos y/o fisurados) apoyada en Sistemas de Información Geográfica.

El método considera (figura 2-22) para el cálculo del factor de protección, PI los siguientes parámetros:

- Factor P, que describe la efectividad de la cubierta protectora, calculada principalmente a partir del espesor y conductividad hidráulica de los estratos, la superficie del terreno y la superficie del agua subterránea, diferenciando:
 - Suelo.
 - Subsuelo.
 - Sustrato no kárstico.
 - Sustrato kárstico.

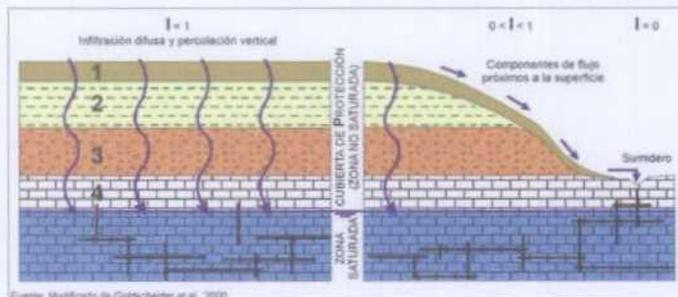


Figura 2-22: Ilustración del método PI (factor P y factor I).

Se calcula mediante la aplicación del método GLA (Hörling *et al.*, 1995) modificado (figura 2-23) obteniendo cinco clases diferentes, valores entre 1, que indica un valor de protección extremadamente bajo, y 5, que indica la existencia de una cubierta protectora muy efectiva.

Su característica fundamental, en lo que se refiere a su potencial aplicación en Galicia, corresponde a la presencia de un factor F (fracturación), en principio pensado para describir el desarrollo del epikarst (en medios kársticos pero también aplicable a medios fisurados) y su influencia en la vulnerabilidad del agua.

- Factor I, que indica el grado en que la cubierta protectora es traspasada por concentraciones de flujo superficiales, especialmente en el área de alimentación de los cursos de aguas superficiales.

No se trata de un factor hidrogeológico estricto, sino de una herramienta semicuantitativa para expresar la vulnerabilidad del agua subterránea producida por el traspaso de la cubierta protectora por flujos superficiales y por flujos laterales subsuperficiales.

Su cálculo se hace, en tres pasos (Figura 2-23):

- Determinación de las propiedades del suelo, clasificándolos en seis tipos diferentes según la distancia al agua subterránea y la conductividad hidráulica del suelo saturado;

- Determinación del factor I', a partir del anterior y la pendiente. Estima la infiltración directa a partir de los flujos superficial y subsuperficial, controlada por las propiedades del suelo, la pendiente y la vegetación;
- Combinación del mapa de superficie del área de alimentación, que indica las áreas de alimentación de cursos de agua que se infiltran en sumideros y "zonas laterales de precaución" de 10 y 100 m a ambos lados de éstos, y el factor I'.

El factor I varía entre 0 ó 0,2, que indica un grado de traspaso de la cubierta muy alto, y 1,0, que indica un grado muy bajo.

El factor de protección final a partir del cual se elaborará el mapa de vulnerabilidad del acuífero se calcula mediante el producto de los factores P e I, obteniéndose valores entre 0 (vulnerabilidad muy alta) y 5 (vulnerabilidad muy baja).

2.7.2. Método DRASTIC

Desarrollado por Aller et al., en 1.987, para su aplicación en medios de porosidad intergranular, se trata de un método con gran variedad de elementos a valorar y con una superficie mínima de aplicabilidad de 0,4 km², que asume la presencia de un contaminante que se incorpora a la zona saturada a través del agua de recarga, y debido a la movilidad de ésta, desde la superficie del terreno.

Los parámetros, que se consideran en la elaboración del índice DRASTIC para un área determinada y que toman valores entre 1 y 10, son los siguientes:

- **D:** Profundidad del nivel freático bajo la superficie del terreno;
- **R:** Recarga que recibe el acuífero;
- **A:** Litología y estructura del medio acuífero;
- **S:** Tipo de suelo;
- **T:** Topografía del terreno;
- **I:** Naturaleza de la zona no saturada;
- **C:** Conductividad hidráulica.

Además, el grado de vulnerabilidad de cada ambiente hidrogeológico viene definido por un índice de ponderación, entre 1 y 5 (Tabla 2-7), dentro del que se diferencian dos series, una para el "índice DRASTIC general" y otra para el "índice DRASTIC agrícola" (pesticidas), no comparables entre sí. La primera serie busca relacionar la vulnerabilidad a los factores hidrogeológicos y morfológicos. La segunda busca reflejar la vulnerabilidad con el uso de productos agroquímicos en áreas agrícolas.

Tabla 2-7: Índices de ponderación para los parámetros usados en el método DRASTIC.

ÍNDICE DE PONDERACIÓN		
PARÁMETRO	DRASTIC	DRASTIC Agrícola
D profundidad del agua	5	5
R recarga neta	4	4
A naturaleza del acuífero	3	3
S tipo de suelo	2	5
T topografía de las pendientes	1	3
I impacto de la zona no saturada	5	4
C conductividad hidráulica	3	2

Cálculo del factor P

Suelo (T)	
Capacidad de campo (mm) hasta 1 m de profundidad	T
> 250	750
> 200 - 250	500
> 140 - 200	250
> 90 - 140	125
> 50 - 90	50
0 - 50	10

Recarga (R)	
Recarga (mm/año)	R
0 - 100	1,75
> 100 - 200	1,50
> 200 - 300	1,25
> 300 - 400	1,00
> 400	0,75

Subsuelo (S)

Tipo de subsuelo (distribución del tamaño de grano)	S
Arcillas	500
Arcillas limosas orgánicas poco plásticas	400
Arcillas ligeramente arenosas	350
Arcillas limosas, limos orgánicos arcillosos poco plásticos	320
Limos orgánicos arcillosos	300
Arcillas muy limosas, arcillas arenosas	270
Limos muy orgánicos	250
Limos orgánicos ligeramente arcillosos, limos orgánicos arcillosos poco plásticos	240
Limos muy arcillosos poco plásticos, limos poco plásticos	220
Arcillas muy arenosas, limos orgánicos arenosos poco plásticos, limos orgánicos ligeramente arenosos, limos orgánicos poco plásticos, limos arcillosos poco plásticos	200
Limos orgánicos arenosos, limos poco plásticos ligeramente orgánicos	180
Limos ligeramente arcillosos poco plásticos, limos arenosos ligeramente orgánicos poco plásticos, limos orgánicos muy arenosos	160

Tipo de subsuelo (distribución del tamaño de grano)	S
Arenas muy arcillosas, arenas arcillosas, arenas limosas orgánicas	140
Limos arenosos poco plásticos, arenas orgánicas muy limosas	120
Arenas orgánicas, arenas limosas poco plásticas	90
Arenas ligeramente arcillosas, arenas limosas, gravas areno-arcillosas	750
Arenas ligeramente orgánicas, gravas arenosas ligeramente plásticas	60
Arenas ligeramente plásticas, arenas ligeramente plásticas con gravas	50
Arenas	25
Arenas con gravas, gravas arenosas	10
Gravas, gravas con brechas	5
Material volcánico (pirocástico) sin litificar	200
Turba	400
Sapropel	300

Litología (L)

Litología	L
Lutitas, pizarras, margas	20
Areniscas, cuarcitas, rocas volcánicas, plutónicas y metamórficas	15
Areniscas y rocas volcánicas porosas	10
Conglomerados, brechas, calizas, dolomías, evaporitas	5

Fracturación (F)

Fracturación	F
No fracturado	25,0
Ligeramente fracturado	4,0
Moderadamente fracturado, ligeramente karstificado o formas karsticas totalmente tapadas	1,0
Moderadamente karstico o formas karsticas tapadas en su mayor parte	0,5
Muy fracturado o muy karstificado y desnudo	0,3
Epikarst muy desarrollado	0,0
No conocido	1,0

Espesor de cada estrato en m (M)

Sustrato (B)
 $B=L \cdot F$

(Presión Artesiana (A) 1500 puntos)*

$$P_{TS} = \left[T + \left(\sum_{j=1}^m S_j M_j + \sum_{j=1}^n B_j M_j \right) \right] \cdot R + A$$

Valor P_{TS}	Efectividad de la cubierta de protección	Factor P
0 - 10	Muy baja	1
> 10 - 100	Baja	2
> 100 - 1000	Media	3
> 1000 - 10000	Alta	4
> 10000	Muy alta	5

MAPA P

(* No considerado en el cálculo del Factor P en otros trabajos (Muguerza, 2001))

Cálculo del factor I

1º paso: Determinación de las propiedades del suelo

Conductividad hidráulica saturada	Profundidad al estrato permeable		
	< 30 cm	30 - 100 cm	> 30 cm
> 10^{-1}	Tipo D	Tipo C	Tipo A
$10^{-2} - 10^{-1}$	Tipo B		
$10^{-3} - 10^{-2}$	Tipo E		
> 10^{-6}	Tipo F		

2º paso: Determinación del Factor I'

Propiedades del suelo	Terrenos Forestales		
	Pendiente		
	< 3,5 %	3,5 - 27 %	> 27 %
Tipo A	1,0	1,0	1,0
Tipo B	1,0	0,8	0,6
Tipo C	1,0	0,6	0,4
Tipo D	0,8	0,6	0,4
Tipo E	1,0	0,6	0,4
Tipo F	0,8	0,4	0,2

Propiedades del suelo	Terrenos de Prados y Pastos		
	Pendiente		
	< 3,5 %	3,5 - 27 %	> 27 %
Tipo A	1,0	1,0	0,8
Tipo B	1,0	0,6	0,4
Tipo C	1,0	0,4	0,2
Tipo D	0,6	0,4	0,2
Tipo E	0,8	0,4	0,2
Tipo F	0,6	0,2	0,0

Poblaciones I' = 0,8

3º paso: Determinación del Factor I *

Mapa de la cuenca vertiente	Factor I'					
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Sumidero, curso superficial que se infiltra (mas 10 m a cada lado) 100 m a cada lado de los cursos superficiales que se infiltran	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cuenca de los cursos superficiales que se infiltran	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Resto del área	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0

(* Factor determinado de manera diferente en Muguerza, 2001)

MAPA I

FACTOR DE PROTECCIÓN

$$\pi = P \cdot I$$

Vulnerabilidad del acuífero superior	Factor π
Extrema	0 - 1
Alta	> 1 - 2
Moderada	> 2 - 3
Baja	> 3 - 4
Muy baja	> 4 - 5

Figura 2-23: Diagrama de desarrollo del método PI.

Para el cálculo del índice de vulnerabilidad DRASTIC a partir de los siete parámetros mencionados se utiliza la ecuación:

$$\text{Índice DRASTIC} = D_R \cdot D_W + R_R \cdot R_W + A_R \cdot A_W + S_R \cdot S_W + T_R \cdot T_W + I_R \cdot I_W + C_R \cdot C_W$$

en la que se considera:

- R : valor del parámetro considerado
- W : índice de ponderación del parámetro

La vulnerabilidad aumenta a medida que aumenta el valor del índice, aunque no se establece una clasificación del índice final de vulnerabilidad en diferentes categorías. Los diferentes parámetros considerados en el índice se valoran de la siguiente manera:

D -Profundidad del agua

A mayor profundidad menor es la vulnerabilidad del agua subterránea. Así se toman los siguientes valores para distintas profundidades:

RANGO (m)	VALOR
< 1,5	10
1,5 – 4,5	9
4,5 – 9	7
9 – 15	5
15 – 22	3
22 – 30	2
30	1

R -Recarga neta

A mayor recarga mayor será la vulnerabilidad. Los valores que se asignan para la recarga neta anual son:

RANGO (mm de recarga)	VALOR
0 – 51	1
51 – 102	3
102- 178	6
178 – 254	8
> 254	9

A-Naturaleza del acuífero

A mayor tamaño de grano y grado de fracturación de la roca acuífera mayor será la conductividad hidráulica y la vulnerabilidad. Los valores asignados son:

DESCRIPCIÓN	RANGO de VALORES	VALOR TÍPICO
A Esquistos masivos	1 – 3	2
B Rocas ígneas/metamórficas	2 – 5	3
C Rocas ígneas/metamórficas alteradas	3 – 5	4
D Alternancias de areniscas, arcillas y calizas	5 – 9	6
E Areniscas masivas	4 – 9	6
F Calizas masivas	4 – 9	7
G Arenas, gravas y conglomerados	4 – 9	8
H Basalto	2 – 10	9
I Calizas karstificadas	9 – 10	10

S-Tipo de suelo

Aproximadamente a menor capacidad de hinchamiento y tamaño de grano menor será su vulnerabilidad. Los valores asignados son según su naturaleza:

NATURALEZA del SUELO	VALOR
Arcilla no expansiva y desagregada	1
Suelo orgánico	2
Marga arcillosa	3
Marga limosa	4
Marga	5
Marga arenosa	6
Arcilla expansiva y/o agregada	7
Turba	8
Arena	9
Grava	10
Delgado o ausente	10

T- Topografía

A mayor pendiente de la zona la vulnerabilidad será menor.

RANGO (% pendiente)	VALOR
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18 %	1

I- Impacto de la zona no saturada

Refleja el tamaño de grano, el grado de fracturación, y la clasificación granulométrica entre otras características. Los valores que se le asignan son:

DESCRIPCIÓN	RANGO de VALORES	VALOR TÍPICO
A Arcilla, limo	1 – 3	2
B Esquistos /pizarras	2 – 5	3
C Calizas	3 – 5	4
D Areniscas	5 – 9	6
E Alternancia de calizas, areniscas y arcillas	4 - 9	6
F Arenas y gravas con contenido en arcillas	4 – 9	7
G Rocas metamórficas/Igneas	4 – 9	8
H Arenas y gravas	2 – 10	9
I Basaltos	9-10	10
J Calizas karstificadas	8 - 10	10

C- Conductividad hidráulica

Condiciona la velocidad del agua y a del contaminante así como la renovación del agua en el interior del acuífero. La vulnerabilidad es más elevada cuanto mayor es la conductividad hidráulica.

RANGO (m/día)	VALOR
< 4,1	1
4 – 12	2
12 – 28,5	4
28,5 – 40,7	6
40,5 – 81,5	8
> 81,5	10

2.7.3. Método SINTACS

Desarrollado con el objetivo de corregir la falta de flexibilidad del método DRASTIC al evaluar la vulnerabilidad para escenarios diversos y para la definición de mapas de vulnerabilidad a escalas más reducidas, en que se presentan sistemas hidrogeológicos muy diversos en Italia (Civita, 1994). Se diferencia del anterior en el peso que se le asigna a cada parámetro y en que toma en consideración el efecto de dilución de la recarga.

El acrónimo SINTACS corresponde a los siguientes parámetros:

- **S**, profundidad del agua.
- **I**, infiltración efectiva.
- **N**, efecto atenuante de la zona no saturada.
- **T**, tipo de suelo.
- **A**, características hidrogeológicas del acuífero.
- **C**, conductividad hidráulica.
- **S**, pendiente topográfica media.

El área de estudio se divide en elementos finitos cuadrangulares, entre 250 y 1000 m de lado.

Al igual que en el caso anterior, se le asigna un valor entre 0 y 10 a cada parámetro, y se considera la posibilidad de existencia de zonas karstificadas para la asignación de los valores a los parámetros N (efecto atenuante de la zona no saturada) y A (características hidrogeológicas del acuífero). A estos parámetros se les asignan valores entre 8 a 10 y de 9 a 10 respectivamente en zonas con karst desarrollado.

El índice de vulnerabilidad viene dado por el sumatorio de los valores de los parámetros, P_J , multiplicados por sus respectivos índices de ponderación, W_J .

$$I_{SINTACS} = \sum_{J=1}^7 P_J \cdot W_J$$

2.7.4. Método GOD

El método GOD (Foster, 1987), para evaluación de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos, es un método paramétrico, práctico y simple, donde el grado de vulnerabilidad es resultado del producto de los valores atribuidos a los tres factores considerados y descritos a continuación (Figura 2-24).

- **G**. Tipo de acuífero que puede ser inexistente, surgente, confinado, semiconfinado cubierto o libre. Valoración entre 0 y 1.
- **O**. Naturaleza del acuífero mediante la caracterización de los estratos existentes por encima de la zona saturada, a través del análisis del grado de consolidación y de la litología. Comprendido entre 0,4 y 1,0.
- **D**. Profundidad del nivel freático, en el caso de acuífero libre, o con el techo del acuífero, en acuíferos confinados. Comprendido entre 0,4 y 1,0.

El producto de esos tres factores da la medida relativa de la vulnerabilidad del acuífero, como se muestra en la figura 2-24.

$$\dot{I}ndice\ GOD = G \cdot O \cdot D$$

La vulnerabilidad del acuífero se considera en un rango de variación del índice final calculado entre 0 y 1. Se definen los siguiente grados de vulnerabilidad, según el valor obtenido:

INDICE GOD	GRADO DE VULNERABILIDAD	
0	NULO	
0 - 0,1	INSIGNIFICANTE	Sin acuífero o muy poco vulnerable
0,1 - 0,3	BAJO	Acuífero con baja vulnerabilidad
0,3 - 0,5	MODERADO	Acuífero con vulnerabilidad moderada
0,5 - 0,7	ALTO	Acuífero con vulnerabilidad alta
0,7 - 1,0	EXTREMO	Acuífero con vulnerabilidad extrema

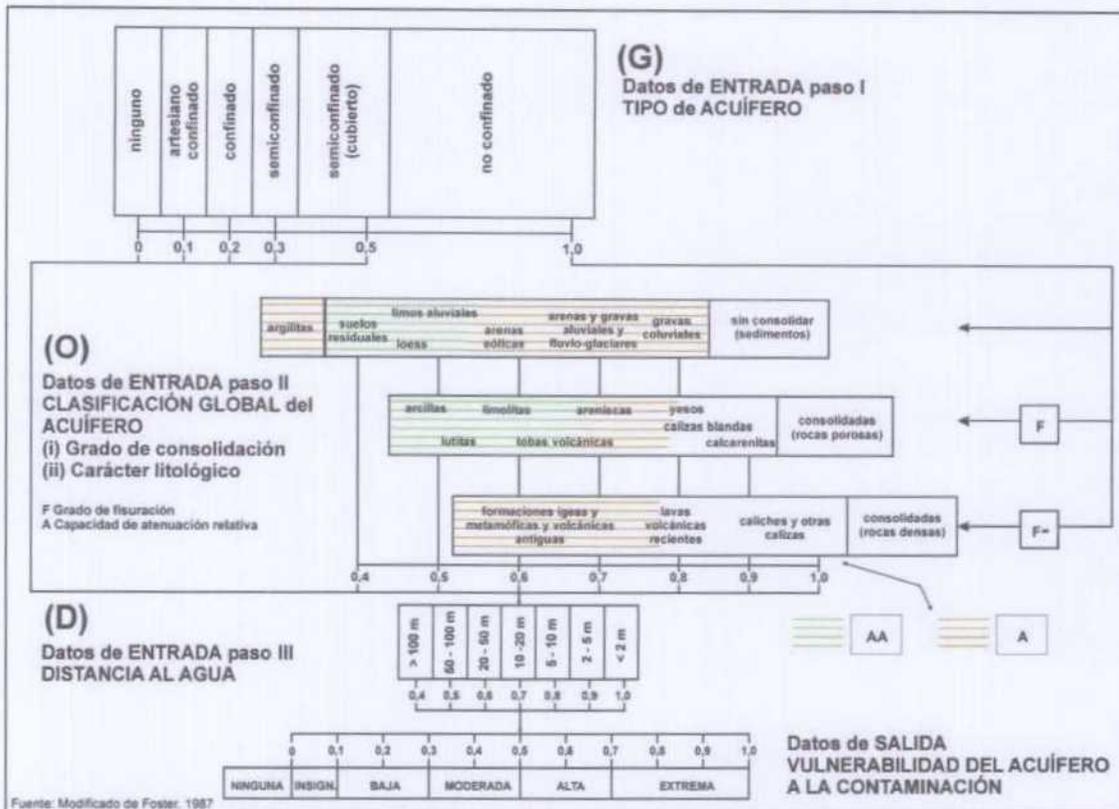


Figura 2-24: Cálculo del índice GOD para la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero.

Métodos específicos para medios fisurados

2.7.5. Método DISCO

El método "DISCO" es aplicable para medios fisurados fuertemente heterogéneos (caso b2 de la figura 2-25) en presencia de flujos de agua subterránea muy rápidos a través de fisuras (100 m/día ó superiores), en que los tiempos de tránsito no aumentan de manera considerable con el alejamiento de la captación y es imposible asimilar el acuífero a un medio con porosidad intergranular.

El método "DISCO" se basa en una evaluación de la vulnerabilidad intrínseca mediante las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas del medio natural, siendo por tanto independiente de la naturaleza del contaminante que permite definir zonas más o menos sensibles a los impactos antrópicos y optimizar la gestión y protección del agua subterránea.

Para evaluar la vulnerabilidad intrínseca considera tres parámetros:

- El parámetro "*discontinuidades*" considera el tránsito de agua en el interior del acuífero entre el punto de infiltración en la cuenca y la captación,
- El parámetro "*cobertura de protección*" considera el efecto de protección de las formaciones suprayacentes al acuífero,
- El parámetro "*escorrentía*" engloba los fenómenos de flujo en la superficie previos a la infiltración.

La aplicación del método "DISCO" se desarrolla en cuatro etapas (Figura 2-26). Estas son:

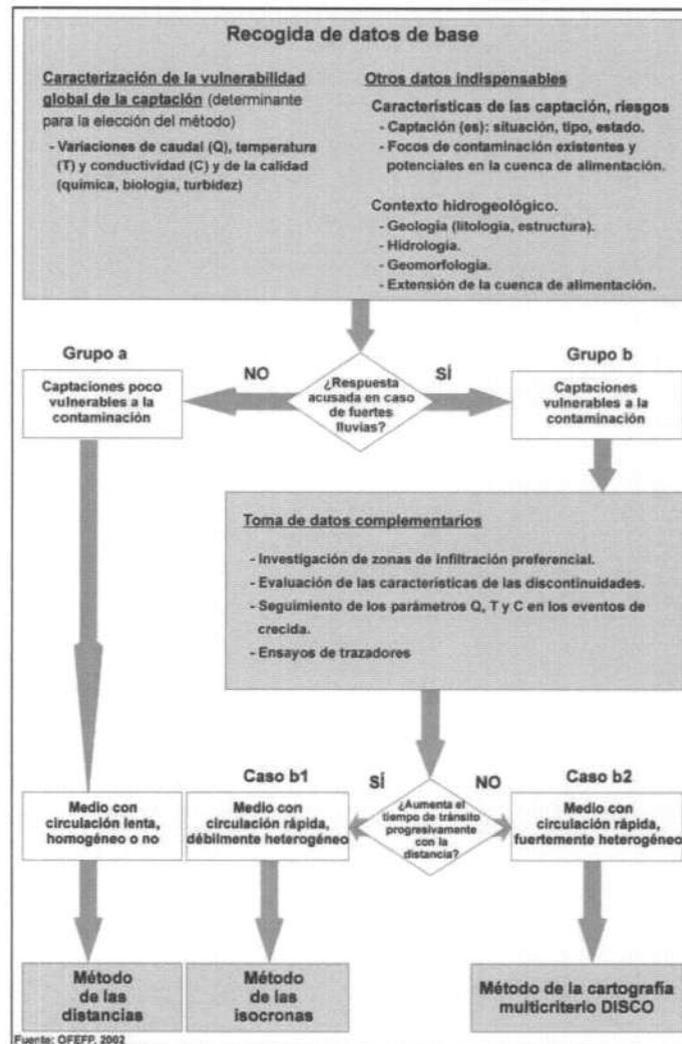


Figura 2-25: Metodología para la delimitación de zonas de protección en medio fisurado empleada en Suiza.

Fase 1: Evaluación de los parámetros “discontinuidades” y “cobertera de protección”

⇒ Parámetro “**DISCONTINUIDADES**”

Indica los contrastes de conductividad hidráulica en el interior del acuífero y determina si los diferentes tipos de estructuras permeables están en conexión directa con la captación.

Se elabora la cartografía a escala de la cuenca de alimentación en base a datos existentes (mapas geológicos y geomorfológicos), observación del terreno (geología, geomorfología), estudio de fotografías aéreas y perfiles geofísicos.

Las propiedades de las diferentes discontinuidades se evalúan mediante su análisis en campo (extensión, abertura, frecuencia, orientación, colmatación, zonas de infiltración preferencial) y ensayos de trazadores. Con ello se definen cuatro clases del parámetro “discontinuidades” cuyos criterios de evaluación se indican en la tabla 2-8, siendo la clase D₀ el caso más vulnerable. Si se demuestra que una discontinuidad o zona de alta

permeabilidad no tiene conexión con la captación se asimilará a una zona de permeabilidad moderada, D₂.

Tabla 2-8: Evaluación del parámetro “discontinuidades”.

Clase	Valor	Criterios de evaluación
D ₀	0	Discontinuidades y conexiones muy rápidas con la captación (del orden de una decena de horas)/sin fenómenos de atenuación significativos.
D ₁	1	Discontinuidades y conexiones rápidas con la captación (del orden de algún día)/ fenómenos de atenuación limitados.
D ₂	2	Conexiones relativamente lentas con la captación (del orden de una decena de días)/ fenómenos de atenuación eficaces: zonas de conductividad hidráulica moderada o discontinuidades sin conexiones rápidas con la captación.
D ₃	3	Conexiones lentas con la captación (varias decenas de días)/ fenómenos de atenuación muy eficaces: zonas caracterizadas por conductividades hidráulicas reducidas

⇒ Parámetro “**COBERTERA DE PROTECCIÓN**”

Evalúa la función protectora de los suelos y de las formaciones geológicas suprayacentes al acuífero.

Se definen tres clases de suelos (Tabla 2-9) en función de una estimación de su permeabilidad y de su espesor. Esta clasificación se ha efectuado mediante las observaciones realizadas en el terreno (ensayos de infiltración, estudio de suelos) y datos reflejados en la bibliografía, (relación entre composición, permeabilidad y poder depurador del suelo). Como simplificación no son tenidos en consideración otros parámetros tales como la cobertura vegetal (campos, praderas, bosques) y el contenido en materia orgánica de los suelos (que tienen notable influencia en la degradación de los contaminantes orgánicos y bacteriológicos).

Cuando existen formaciones geológicas de baja permeabilidad intercaladas entre el suelo y el acuífero, el índice determinado para los suelos debe ser modificado para tener en cuenta el efecto protector adicional de estas capas. Los sondeos permiten determinar el espesor de la capa de suelo y evaluar sus características. La cartografía de suelos se hace en base a un número suficiente de sondeos distribuidos por la cuenca de alimentación. Posteriormente estos datos puntuales son regionalizados considerando entre otros aspectos el análisis geomorfológico (en el terreno y mediante fotografía aérea).

Para determinar el espesor y naturaleza de las formaciones de baja permeabilidad se emplean los estudios geológicos, geomorfológicos, la información obtenida en sondeos, los trabajos de ingeniería civil (excavaciones, catas) así como la testificación geofísica.

Tabla 2-9: Evaluación del parámetro “cobertera de protección”.

a) Suelos				
Espesor (m)	Suelo muy permeable (arenas, bloques)	Suelo con permeabilidad moderada (limos)	Suelo poco permeable (limos, arcillas)	
0 – 0,2	P ₀	P ₀	P ₀	
0,2 – 0,5	P ₀	P ₀	P ₁	
0,5 – 1,0	P ₀	P ₁	P ₂	
> 1,0	P ₁	P ₁	P ₃	
b) Presencia de formaciones geológicas de baja permeabilidad (arcillas, limos, margas)				
Espesor (m)	Combinado con suelo P ₀	Combinado con suelo P ₁	Combinado con suelo P ₂	Combinado con suelo P ₃
< 1m	P ₁	P ₂	P ₃	P ₃
1 – 2m	P ₂	P ₃	P ₃	P ₄
> 2m	P ₃	P ₃	P ₄	P ₄

Fase 2: Cálculo del factor de protección intermedio, F_{int}

Algunos ensayos de infiltración (ensayo con doble anillo de Müntz...) pueden permitir verificar de manera puntual la permeabilidad de la cobertera de protección.

El factor de protección intermedio (Tabla 2-10) permite determinar en cada punto la facilidad con la que un contaminante se infiltrará en el suelo hacia la captación. Un factor de protección muy débil corresponderá a una vulnerabilidad muy elevada, es decir los contaminantes llegarán rápidamente a la captación desde ese punto, sin que los fenómenos de atenuación (filtración, auto-depuración, dilución) sean eficaces.

El cálculo del factor de protección intermedio F_{int} se efectúa, a partir de los

$$F_{int} = (2 \cdot D) + (1 \cdot P)$$

parámetros discontinuidades (D) y cobertera de protección (P), de la siguiente manera:

Se considera que el parámetro D es más importante que el factor P . Las rocas permeables pueden presentar zonas de infiltración preferencial, como es el caso de las dolinas. La existencia de vías preferenciales en los suelos, ligadas a la presencia de madrigueras, raíces o frentes de desecación, producen también posibilidades de circulación rápida hacia el acuífero.

Tabla 2-10: Valores del factor de protección intermedio ($F_{int} = 2 \cdot D + 1 \cdot P$).

	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4
D_0	0	1	2	3	4
D_1	2	3	4	5	6
D_2	4	5	6	7	8
D_3	6	7	8	9	10
Valor	$F_{int} = 0, 1$	$F_{int} = 2, 3, 4$	$F_{int} = 5, 6, 7$	$F_{int} = 8, 9, 10$	
Protección	Muy baja	Baja	Media	Fuerte	
Vulnerabilidad	Particularmente fuerte	Fuerte	Media	Baja	

Fase 3: Determinación del factor de protección final, F

⇒ Parámetro "ESCORRENTÍA"

La escorrentía de superficie (Tabla 2-11) puede inducir el desplazamiento lateral de los contaminantes, decenas de metros en el caso de escorrentía difusa y centenares de metros a lo largo de canales o drenes naturales (cursos de agua permanentes o temporales, arroyos, caminos).

Sólo se considera en las zonas en las que los parámetros "discontinuidades" y "cobertura de protección" combinados indican un factor de protección intermedio de valor bajo o muy bajo y en presencia de una escorrentía significativa y permite la delimitación de las cuencas que alimentan las superficies más vulnerables.

Implica la ampliación del valor del factor de protección intermedio a las cuencas vertientes locales vulnerables. Este nuevo valor, llamado F, reemplaza al valor del factor de protección intermedio anteriormente obtenido. Fuera de estas cuencas vertientes el valor de F será el mismo que el calculado de F_{int} .

Los tres factores que determinan la importancia de la escorrentía son la pendiente, la permeabilidad del suelo y las condiciones previas de humedad. Como medida de simplificación para la cartografía de este parámetro sólo se tienen en cuenta la pendiente y la red de drenaje

superficial. Para cartografiar la escorrentía sobre las zonas con un factor de protección natural bajo o muy bajo, se utilizan mapas topográficos a gran escala (1:10.000 ó 1:5.000) y fotografías aéreas, complementándose con un reconocimiento detallado del terreno, sobre todo en periodos de precipitaciones fuertes.

Tabla 2-11: Determinación de la extensión de las superficies a considerar al contemplar el parámetro “escorrentía”.

a) Escorrentía difusa a lo largo de las pendientes :	
Cuenca vertiente local relativamente uniforme sin canales o sistemas de drenaje	
Pendiente:	Extensión de la cuenca vertiente a considerar:
2 – 10 %	10 m aguas arriba o en torno a la superficie vulnerable considerada
10 – 25 %	20 m aguas arriba de la superficie vulnerable considerada
> 25 %	30 m aguas arriba de la superficie vulnerable considerada
<ul style="list-style-type: none"> - En presencia de thalwegs, canales, caminos o drenes colectores de aguas de escorrentía, la extensión de la cuenca vertiente local a considerar debe contemplar éstos. - La extensión de las superficies a considerar debe ser fijada en base a las observaciones realizadas en campo esencialmente en los terrenos de pasto. De manera general la escorrentía es netamente inferior en las zonas de bosque por la existencia de un suelo más aireado de espesor reducido. En este caso se puede admitir la toma en consideración de cuencas de alimentación locales de extensión muy pequeña 	
b) Cursos de agua permanentes o temporales con infiltración:	
Extensión a atribuir a una cuenca vertiente local	Lechos y riberas del curso de agua, cuenca vertiente local según los criterios especificados para la escorrentía

Fase 4: Delimitación de las zonas de protección

Antes de delimitar las zonas de protección es necesario verificar si son fiables los datos del terreno utilizados para la cartografía en el conjunto de la cuenca de alimentación y, en caso de incertidumbre, contemplar la obtención de datos complementarios y si se ha realizado la cartografía con márgenes de seguridad. Es necesario analizar los resultados obtenidos para el factor de protección para evaluar su coherencia con el funcionamiento hidrodinámico del lugar, con el modelo conceptual “DISCO” y con la respuesta global del sistema.

La delimitación de las zonas de protección se realiza sobre la base de una relación de equivalencia entre el valor del factor F y las zonas S (Tabla 2-12).

Tabla 2-12: Relación de equivalencia entre el factor final (F) y las zonas de protección de las aguas subterráneas (S).

Factor de protección F	Vulnerabilidad	Zonas S
F muy bajo (0, 1)	Particularmente alta	S1
F bajo (2, 3, 4)	Alta	S2
F medio (5, 6, 7)	Media	S3
F alto (8, 9, 10)	Débil	Resto de la cuenca de alimentación

Es recomendable la utilización de un Sistema de Información Geográfico.

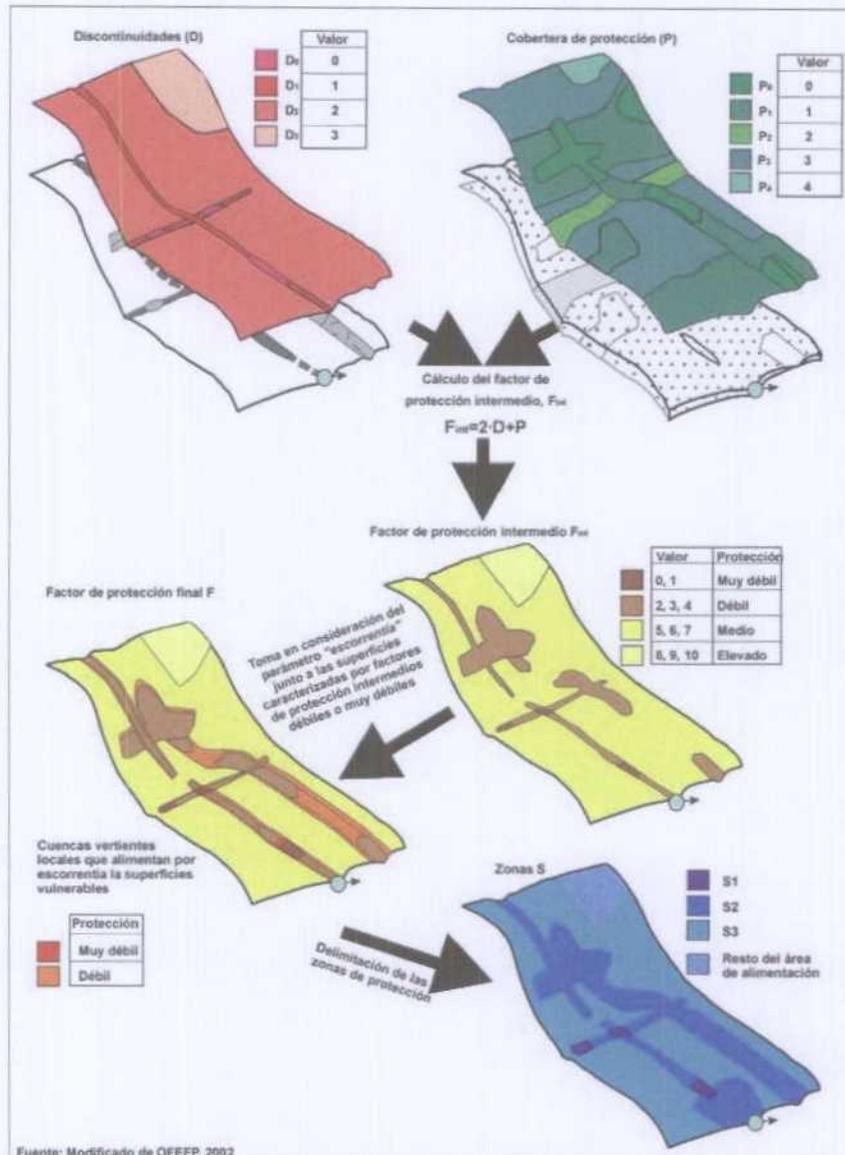


Figura 2-26: Delimitación de zonas de protección mediante el método de cartografía multicriterio DISCO.

2.8. Empleo de contornos de probabilidad para la delimitación de perímetros de protección

El empleo de modelos numéricos para medios con porosidad intergranular para determinar el área de alimentación y tiempos de tránsito de partículas hasta la captación, simulando la componente advectiva de su transporte, no es adecuado para acuíferos fracturados. En estos medios no es posible efectuar las simplificaciones asumibles en acuíferos con porosidad intergranular y debido a la extrema heterogeneidad de los sistemas de fracturas, y de los parámetros característicos del acuífero que pueden tomar un amplio rango de valores.

Como alternativa, en los acuíferos fracturados, diversos autores proponen efectuar un tratamiento riguroso de las incertidumbres asociadas a sus características aplicando una metodología específica para obtener zonas de protección basadas en probabilidad (Environment Agency, 2001 a y 2001 b). En la actualidad se ha propuesto una metodología en el Reino Unido, que ha sido aplicada en diferentes acuíferos fracturados (Robinson y Barker, 2000; Robinson y Barker, 2001). En ella se emplean modelos estocásticos como herramienta para delimitar zonas de protección basadas en análisis de riesgo al medio ambiente, contemplando la incertidumbre en los parámetros simulados.

Para elaborar modelos de fracturación estocásticos se requiere como mínimo conocer de cada conjunto de fracturas la distribución de densidad o espaciado, orientación, longitud y apertura.

Los datos que existen normalmente en el entorno de las captaciones de abastecimiento comprenden: ensayos de bombeo (transmisividad, coeficiente de almacenamiento y cono de depresión), cartografía geológica, columna litológica y logs geofísicos en las captaciones. En algunas ocasiones se dispone además de testificación geofísica de zonas más amplias, ensayos de bombeo en secciones aisladas mediante obturadores y ensayos de trazadores. Es decir en muchos casos no se dispone de todos los parámetros y distribuciones requeridas para realizar un modelo estocástico.

Para suplir esa carencia se puede recurrir al análisis de fracturas aflorantes (que requiere poco tiempo y proporciona información sobre densidad, orientación y longitud de las fracturas), extrapolar datos entre diferentes regiones del mismo estilo estructural o inferirlos a partir de relaciones teóricas.

Las relaciones teóricas más empleadas son:

- Densidad de fracturas o espaciado.
- Orientación.
- Longitud de fracturas.
- Apertura.

Los estudios realizados referentes a estos parámetros indican (Robinson y Barker, 2001) que siguen una distribución estadística. Así la longitud, apertura y densidad siguen una distribución log normal y la orientación tiende a seguir una distribución elíptica.

Cabe concluir, por tanto, que empleando los sistemas anteriormente indicados es posible obtener los datos requeridos para aplicar un modelo de fracturación estocástico, pero, por desgracia, el dominio que puede ser modelado usando

éste, incluso en ordenadores personales potentes, es solamente válido para la zona de protección más próxima a la captación y no para las demás.

Para suplir esta carencia hay que simular la heterogeneidad de los sistemas de flujo por fracturas pero dentro de la estructura de un modelo de porosidad intergranular tridimensional para poder aplicar la modelización estocástica a todo el perímetro de protección. Esto puede lograrse (Robinson y Barker, 2001) combinando un modelo de flujo tridimensional a través de fracturas, como el FRACMAN y un modelo por porosidad intergranular, como el MODFLOW.

La metodología propuesta (Robinson y Barker, 2001) consta de cuatro etapas, ilustrándose con la aplicación por dichos autores a un acuífero en areniscas en Gloucester (Reino Unido):

- Etapa 1. Obtención de los datos referentes a los parámetros característicos de las fracturas y su distribución.
- Etapa 2. Modelización del flujo por fracturas:

En primer lugar se introduce y calibra la información referente al sistema de fracturas, para obtener una concordancia entre las características de la red de fracturas definida y los parámetros medidos de las mismas. Para ello puede emplearse el modelo FRACMAN (Dershowitz *et al.*, 1998) u otro similar.

Con estos parámetros se efectúa una modelización del flujo para obtener la calibración empleando los datos de los ensayos de bombeo.

Estos parámetros se emplean para obtener múltiples modelizaciones de este sistema de fracturas ya calibrado. Se aplica un gradiente hidráulico a través de cada uno de los bloques considerados en diferentes direcciones, calculándose el flujo de entrada y salida de cada bloque. Esto permite obtener una conductividad hidráulica efectiva del bloque usando la ley de Darcy para cada una de las diferentes direcciones consideradas. El proceso se repite hasta que la distribución de conductividades hidráulicas en cada dirección se estabilice.

Se varía entonces el tamaño del bloque de fracturas usado en la simulación, para asegurar que el tamaño empleado de éste puede considerarse un volumen elemental representativo (VER) de la roca, en el cual los valores de los tensores de conductividad hidráulica y porosidad se estabilizan.

- Etapa 3. Simulación de flujo y de trayectorias de partículas:

Las distribuciones de los valores direccionales de conductividad hidráulica y porosidad se introducen en un modelo de flujo para medios con porosidad intergranular, como MODFLOW, con celdas del mismo tamaño o superior que la correspondiente al volumen elemental representativo, que se ha determinado en la etapa 2, introduciéndose los límites y condiciones de contorno (recarga, ríos y drenes entre otros). Se calibra entonces el modelo empleando parámetros no utilizados en las calibraciones de etapas previas, como por ejemplo la recarga.

Por último una vez concluida la calibración se simula la trayectoria de las partículas para múltiples realizaciones del modelo.

- Etapa 4. Contornos de probabilidad de la trayectoria de las partículas:

Se analiza la trayectoria de las partículas definiéndose contornos de probabilidad para los diferentes tiempos de tránsito considerados al definir las zonas en que se subdividen los perímetros de protección.

Para crear los contornos de probabilidad en todo el dominio del modelo se emplea un modelo estocástico, capaz de efectuar simulación de trayectorias de partículas aguas arriba para múltiples escenarios y múltiples realizaciones de cada escenario, sobreimponiéndose una malla horizontal bidimensional en el área definida para dichas trayectorias.

Para los contornos de tiempo de tránsito considerados se contabilizan las veces que cada partícula pasa a través de cada celda de la malla.

Muchas partículas pasarán a través de la mayoría de las celdas de la malla al ser múltiples escenarios y múltiples realizaciones de cada uno de ellos, definiéndose así una distribución de tiempos de tránsito para cada elemento. El análisis de su distribución permite definir la probabilidad de partículas que requieren un tiempo de tránsito para alcanzar la captación.

Al calcular los contornos de probabilidad del área de alimentación de la captación la probabilidad de que una celda de la malla esté dentro de la misma se calcula como la proporción de realizaciones para las cuales ninguna partícula ha entrado. Las probabilidades se calculan de la misma forma que en la correspondiente a los tiempos de tránsito elegidos, por lo tanto las mayores probabilidades suceden a mayores distancias de la captación (figura 2-27).

Para proteger la captación en un alto grado deberían emplearse idealmente contornos de probabilidad elevados (por ejemplo 90-95 %) que abarcarán el área más grande alrededor de la captación. Sin embargo esto llevaría a definir zonas muy grandes, probablemente inasumibles respecto a las restricciones a la actividad del suelo que implica la aplicación de esta metodología al delimitar perímetros de protección.

Una alternativa podría ser la aplicación de diferentes probabilidades a las diferentes actividades según su riesgo potencial de contaminación del agua subterránea.

Las diferentes zonas empleadas deben representarse en mapas separados para evitar confusiones, puesto que es probable que por ejemplo los contornos

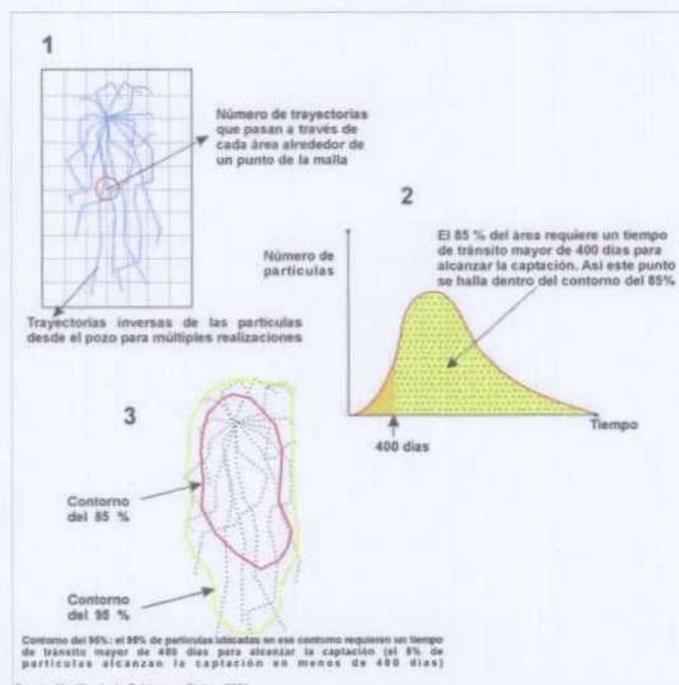


Figura 2-27: Técnica de desarrollo de los contornos de probabilidad para las zonas de protección de 400 días.

de baja probabilidad de una zona de tiempo elevado se superpongan con los contornos de alta probabilidad de menor tiempo.

Las zonas de protección delimitadas en acuíferos fracturados aplicando esta metodología se prevé que serán más grandes que las obtenidas mediante una aproximación a medios con porosidad intergranular, pero en cambio tendrían la ventaja de ser más defendibles ya que consideran las características del medio fracturado (Robinson y Barker, 2001).

No obstante la complejidad que requiere su empleo y las limitaciones implícitas hacen difícil la aplicación generalizada de esta metodología a la problemática española.

2.9. Método de Bolsenkötter

El método de Bolsenkötter es una modificación del método de Rehse, concebido este último para el cálculo del poder depurador de los materiales para acuíferos de porosidad intergranular (Tabla 2-5), aplicable a los materiales fisurados.

El método de Rehse es aplicable a sistemas isótropos, en los cuales la circulación del agua se produce a través de un medio con porosidad intergranular, por su parte Bolsenkötter propone otro similar pero aplicable a los medios fisurados que lo completa.

El poder depurador de las rocas en medios fisurados es menor que en los medios con porosidad intergranular y por ello aumenta las distancias necesarias para conseguir una depuración total. Para el cálculo de éstas Bolsenkötter propone unos nuevos índices que aparecen reflejados en la tabla 2-13, donde I_r es el índice de depuración en la zona no saturada, para ser utilizados con la misma metodología utilizada para medios con porosidad intergranular.

Tabla 2-13: Poder depurador de las rocas (Bolsenkötter).

M	Descripción del material	H(m)	$I_r = 0,5/h$
1	Margas	10	0,05
2	Areniscas con capas arcillosas. Arcillas, micaesquistos y filitas	20	0,025
3	Basaltos y rocas volcánicas	30	0,017
4	Grauvacas, arcosas, areniscas arcillosas, limosas	50	0,01
5	Granito, granodiorita, diorita, sienita	70	0,007
6	Cuarcitas, areniscas con sílex	100	0,005
7	Calizas	200	0,0025

Se calcula a partir de estos datos:

$$M_X = M_A + M_R$$

siendo:

M_X : Poder depurador sobre la totalidad del transporte.

M_A : Poder depurador en el trayecto horizontal (zona saturada).

M_R : Poder depurador en el trayecto vertical (zona no saturada).

y por tanto la depuración es total cuando M_X toma valores mayores o iguales a 1.

Para ello se calcula la depuración en la zona no saturada, mediante la expresión:

$$M_R = \sum_{i=n}^{i=1} h_i \cdot I_{r_i}$$

en la que:

h_i = Espesor vertical de los materiales en la zona no saturada.

I_{r_i} = Índices de depuración para esos materiales en la zona no saturada.

En los casos en que $M_R \geq 1$ la depuración en la zona no saturada es completa, por lo que no sería necesario determinar ningún perímetro de protección.

En los casos en los que esta depuración en la zona no saturada no es completa se calcula la depuración en la zona saturada, que será, en el caso que se busca con $M_X=1$:

$$M_A = 1 - M_R$$

y la distancia L que como mínimo necesario recorrer el agua para alcanzar una depuración total en la zona saturada, será:

$$L = M_A / I_A$$

Donde:

I_A = Índice de depuración de la zona saturada correspondiente al material acuífero.

L = Longitud atravesada de la zona saturada.

2.10. Delimitación de perímetros de protección de la cantidad

Es imprescindible aplicar metodologías que contemplen regulaciones a establecer en un área del acuífero en el entorno de las captaciones de aguas hidrominerales para garantizar el volumen extraído en las mismas. Este área ha de quedar definida junto con las regulaciones a establecer, a partir de la aplicación de una metodología adecuada.

En general la protección de la cantidad del recurso hidromineral se lleva a cabo mediante la aplicación o combinación de:

- Criterios de tipo hidrogeológico, mediante la caracterización hidrogeológica del acuífero captado en la que se realice un balance para la cuantificación de los recursos y las reservas.
- Métodos analíticos, para la definición del área que proporcionará el caudal necesario. Se puede contemplar la aplicación de diversos métodos:
 - Método del radio fijo calculado, ecuación volumétrica (USEPA, 1993), delimita el área de un cilindro de acuífero necesario para proporcionar el caudal bombeado, considerando que procede íntegramente del agua almacenada, definida por el volumen del cilindro y la porosidad eficaz, considerando la recarga despreciable (Tabla 2-5).
 - Método que delimita el área necesaria para proporcionar mediante la recarga el volumen extraído (Environment Agency, 1998; Morris, 1994) (Tabla 2-5).
 - Método del radio fijo calculado, función del descenso (Theis 1935; USEPA, 1987) (Tabla 2-5).
 - Método de Albinet (Albinet, 1972 en Lallemand-Barrès y Roux, 1989) (Tabla 2-5), emplea la misma ecuación de Theis (Theis, 1935) para el régimen transitorio, con idéntica formulación que el método anterior para la obtención de las curvas de descenso en función de la distancia a la captación, que superpuestas a los valores de piezometría previos al bombeo, indican por sustracción los valores modificados de la carga hidráulica. A partir de esos valores se trazan las isopiezas resultantes tras el bombeo, y las líneas de corriente hasta la captación, definiendo así el área de llamada de la captación.
 - Método de Hoffman y Lillich (Hoffman y Lillich, 1973, en Lallemand-Barrès y Roux, 1989) (Tabla 2-5).
 - Método de Horsley (Horsley, 1983, en USEPA, 1987) (Tabla 2-5).
- Modelos matemáticos de flujo y balance por zonas que permiten simular diferentes hipótesis de extracción de aguas y su repercusión en las captaciones, demandas ambientales y concesiones existentes para diferentes usos (figura 2-29).

La metodología general para la protección del recurso hidromineral en cantidad, se describe a continuación y se esquematiza en la figura 2-28 indicándose secuencialmente los diferentes estudios a elaborar y diversos métodos aplicables.

ETAPA A:

Recopilación y análisis de la información existente sobre la Unidad Hidrogeológica en la que se ubica la captación objeto de protección, especialmente respecto a sus recursos, la Norma general de explotación y las diferentes regulaciones existentes respecto a demandas ambientales, y de otro tipo, así como a las concesiones existentes para diferentes usos.

ETAPA B:

Estudio detallado del acuífero explotado por las captaciones de recursos hidrominerales, con un balance hidrogeológico detallado, cuantificando sus recursos y reservas (si es posible) y contemplando las limitaciones establecidas al recurso en la Unidad Hidrogeológica que le afecten efectuándose los estudios indicados en la etapa B en la figura 2-28. Habría que analizar además la relación del acuífero con otros, tanto física como de gestión del recurso hídrico.

El análisis de la piezometría en diferentes estaciones y diferentes sectores permite, además de caracterizar el funcionamiento hidrogeológico del acuífero, contrastar los datos del balance, siendo de gran utilidad para delimitar zonas de protección, excepto en los casos en que existan grandes cambios de niveles y de direcciones de flujo estacionales o muy variables.

El dato de caudal se empleará posteriormente en los diferentes métodos existentes para definir zonas de protección, y será básico para definir cuándo se produciría afección a la captación de recursos hidrominerales.

ETAPA C:

La recopilación crítica de información y el análisis hidrogeológico detallado del acuífero captado, efectuado en las primeras etapas del estudio, debe complementarse con la aplicación de otros métodos para definir con mayor precisión la zona a proteger, recomendándose inicialmente la aplicación de métodos analíticos o de parámetros agregados, como primera aproximación, combinándose los resultados obtenidos en la aplicación de cada uno de ellos (Tabla 2-5 y figura 2-28).

ETAPA D:

Es muy conveniente contrastar y, en su caso, modificar las zonas obtenidas mediante la combinación de los diferentes métodos analíticos efectuando ensayos de trazadores, destacando el estudio de los isótopos estables del agua ^{18}O y deuterio, el empleo del análisis del contenido en tritio y el empleo de colorantes como la fluoresceína, al ser especialmente adecuadas para este tipo de estudios.

ETAPA E:

Evaluación de la disponibilidad de la información suficiente para poder efectuar un modelo matemático del acuífero, mediante el análisis del grado de conocimiento respecto a los límites y condiciones de contorno, funcionamiento hidrogeológico del acuífero, valores de piezometría y de parámetros hidráulicos, entre otros factores.

En caso de que no se disponga de suficiente información se dará por terminado el análisis, integrando los resultados obtenidos previamente.

ETAPA F:

La simulación matemática, que se realiza cuando se dispone de información suficiente para la ejecución, y calibrado del modelo, consta de las siguientes fases:

- Selección del modelo matemático más adecuado a las características del acuífero a modelizar.
- Calibración en régimen permanente y transitorio.
- Simulación de flujo.
- Simulación de la componente advectiva del transporte.

Cabe indicar especialmente que, si bien lo más habitual es el empleo de modelos de flujo para definir la protección de la cantidad también puede emplearse la simulación de la componente advectiva del transporte simulando la procedencia de las partículas para tiempos de tránsito muy elevados, lo que permitiría definir el área de alimentación (Rayne *et al.*, 2001).

La simulación matemática permite modelizar diferentes hipótesis de extracción de aguas subterráneas en la zona de estudio, y su repercusión en las captaciones de recursos hidrominerales, demandas ambientales y concesiones existentes para abastecimiento y otros usos, por lo que constituye una herramienta muy útil para definir la protección del recurso hídrico en cantidad en las captaciones (figura 2-29).

La metodología descrita debe concluir con la integración de los análisis efectuados y la elaboración de una norma que contemple las regulaciones a establecer en un área del acuífero, en el entorno de las captaciones, para garantizar el volumen extraído.

Esta incluirá el volumen global máximo de extracción en el entorno delimitado, la cuantía máxima de extracción para captaciones distintas de la que es objeto de protección, demandas ambientales, profundidades de sondeos y de instalación de bombas, distancias mínimas a la captación protegida entre otras.

Otra aproximación a la protección de las captaciones de aguas hidrominerales (López Arechavala, 2000) considera (de modo complementario a la metodología antes desarrollada) que al evaluar los recursos hidrominerales, se pueden encontrar diferentes contextos hidrogeológicos que hay que tener en cuenta para la definición de la protección cuantitativa del recurso. Así se pueden diferenciar los siguientes escenarios:

A- Sistemas hidrogeológicos de importancia cualitativa y cuantitativa.

Los recursos hidrominerales suponen una fracción irrelevante de la carga/descarga totales del acuífero. El cálculo de los recursos específicamente hidrominerales es tanto inviable (caen dentro del error de las estimaciones) como innecesario.

B- Formaciones con mediocre calidad hidrodinámica. Por ejemplo unidades hidrogeológicas correspondientes a “zonas con acuíferos aislados o sin acuíferos”.

De escaso interés cuantitativo en la planificación. Suelen ser “reservas hidrominerales” compatibles con la “explotación minifundista”.

C- Sistemas con descarga de una circulación de agua subterránea de gran penetración (hasta varios km) y considerable tiempo de residencia (desde décadas hasta milenios) muchas veces termales.

Son recursos con una escasa variación temporal tanto cualitativa (mineralización) como cuantitativa (caudal de descarga).

Estos recursos son fácilmente calculables ya que corresponden a las descargas conjuntas de todas sus surgencias naturales cuando funcionen en régimen no influenciado por bombeos.

La salvaguarda de las aguas termales obliga a evitar su mezcla con aguas frías frecuentemente con un tiempo de tránsito mucho menor, regular otras extracciones en la zona de flujo ascendente así como las obras civiles de su entorno que pudieran afectar al mismo.

Las adecuadas características de diseño y construcción de las captación, de modo similar a lo expuesto en el apartado 2.2, deben evitar la mezcla de aguas termales con otros flujos de aguas más frías, como es el caso de las procedentes de acuíferos someros en el entorno de la captación explotada o de cursos fluviales próximos a las mismas.

Las aguas termales pueden verse afectadas además por la ejecución de obras civiles así como por la existencia de otras extracciones que capten el mismo recurso disminuyendo su caudal o modificando la dirección del flujo termal en su trayecto final. Estos factores se deben considerar principalmente en el contexto de la protección cuantitativa antes indicado.

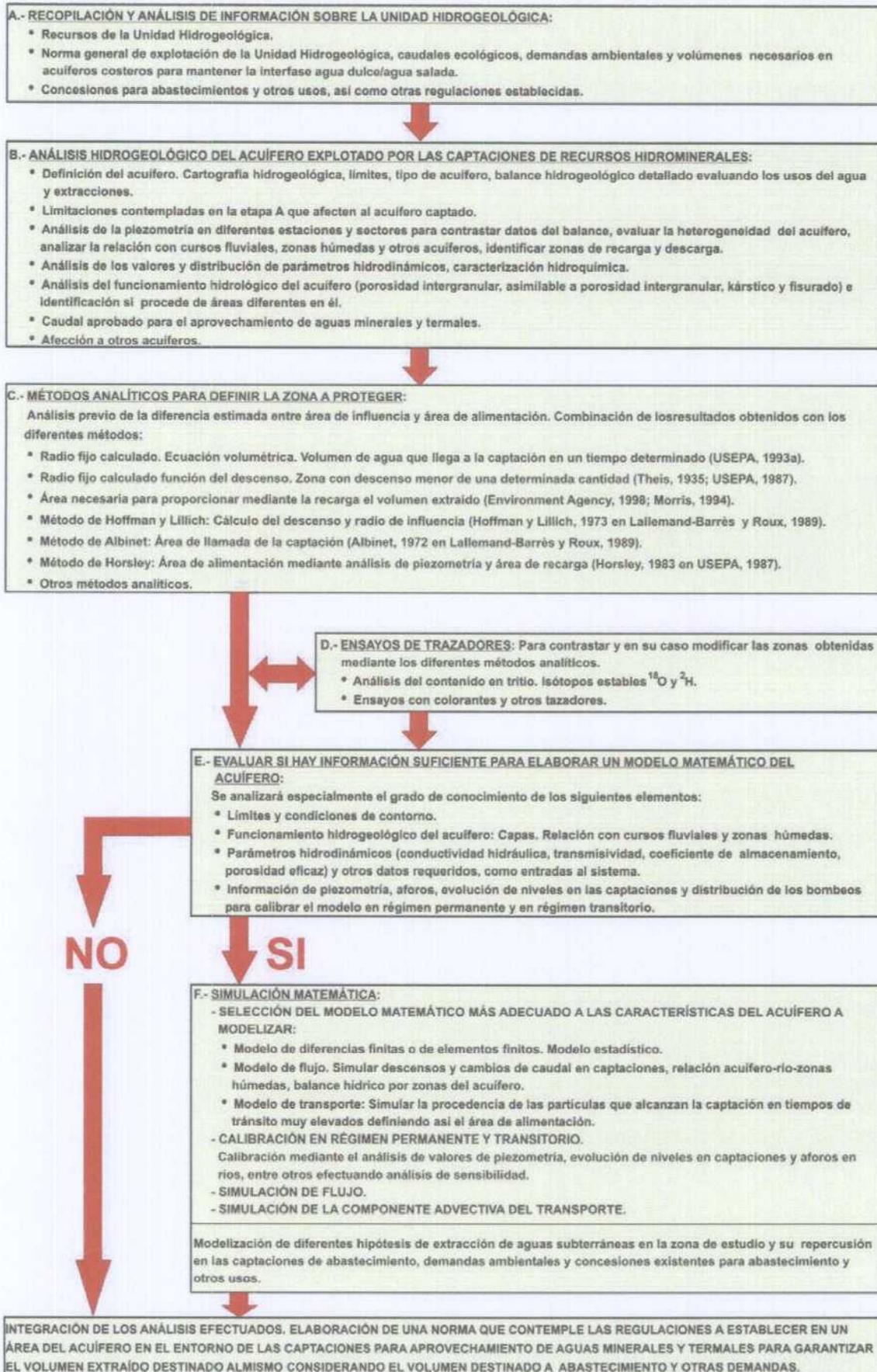
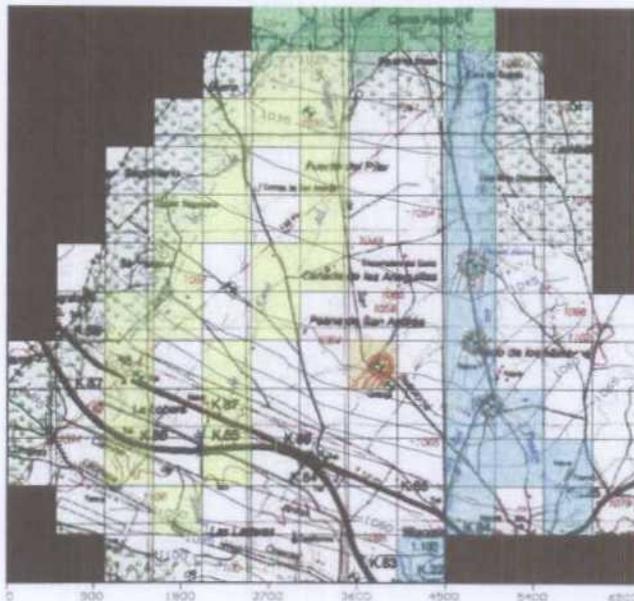


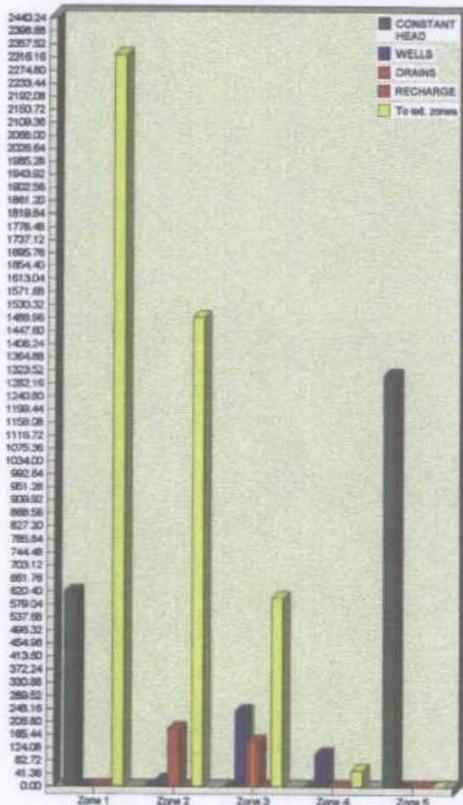
Figura 2-28: Metodología para la protección del recurso hídrico en cantidad.



- Zona 1: Resto del modelo excepto las zonas 2-3-4-5.
- Zona 2: Drenes Arroyo de la Asperilla y de la Casa del Caballero.
- Zona 3: Drenes Arroyo de los Prados y del Valle.
- Zona 4: Sondeos de abastecimiento San Bartolomé y de la granja avícola Velasco.
- Zona 5: Celdas de nivel constante.

Fuente: Martínez Navarrete, 2002

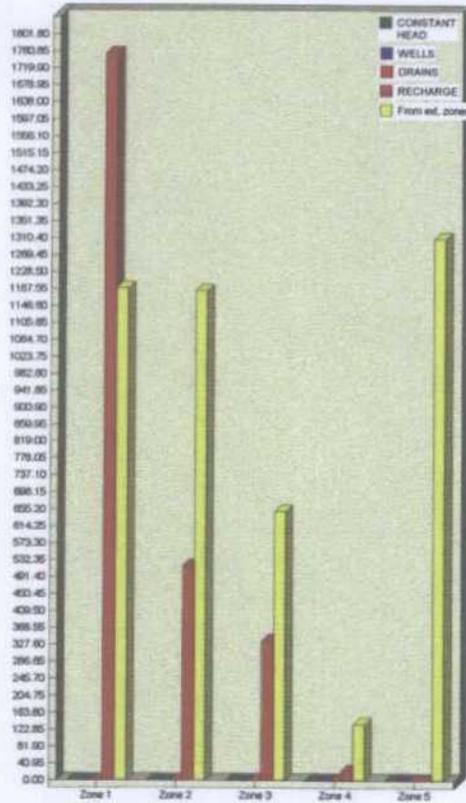
Zone Budget: Outflow



- Zona 1: Resto del modelo no incluido en zonas 2, 3, 4 y 5.
- Zona 2: Drenes arroyos de la Asperilla y de la Casa del Caballero (al oeste).
- Zona 3: Drenes arroyos de los Prados y del Valle (al este).
- Zona 4: Sondeos de abastecimiento San Bartolomé y de la Granja Avícola Velasco.
- Zona 5: Celdas de nivel constante (límite norte de la zona modelada).

Fuente: Martínez Navarrete, 2002.

Zone Budget: Inflow



- Zona 1: Resto del modelo no incluido en zonas 2, 3, 4 y 5.
- Zona 2: Drenes arroyos de la Asperilla y de la Casa del Caballero (al oeste).
- Zona 3: Drenes arroyos de los Prados y del Valle (al este).
- Zona 4: Sondeos de abastecimiento San Bartolomé y de la Granja Avícola Velasco.
- Zona 5: Celdas de nivel constante (límite norte de la zona modelada).

Fuente: Martínez Navarrete, 2002.

Figura 2-29: Modelos matemáticos de flujo y balance por zonas.

3. Análisis comparativo de los resultados de aplicar diferentes métodos a zonas piloto para la obtención de metodologías aplicables generalizadamente a las captaciones de aguas minerales y termales en Galicia

En este apartado se evalúa la posibilidad de aplicación de los métodos analizados en los apartados 2-5 a 2-10 para la delimitación de perímetros de protección en medios fisurados con objeto de salvaguardar los recursos hidrominerales de la Comunidad Autónoma de Galicia.

Para llevar a cabo estos trabajos se ha seleccionado en este estudio, por sus características hidrogeológicas, actividad antrópica y problemática asociada, la concesión de aprovechamiento de recursos hidrominerales correspondiente al Balneario de Laias en el municipio de Cenlle, Orense

En este contexto se expondrán (en el apartado 3.1) las características de la zona seleccionada (Balneario de Laias) y se analizarán (en el apartado 3.2) los datos existentes en la información previa recopilada de aquellos necesarios para la aplicación de cada uno de los métodos y el grado de conocimiento de cada uno de los parámetros o características.

Posteriormente, y de manera similar, se llevará a cabo en el apartado 3.3 un análisis de las carencias de datos existentes para la aplicación de dichos métodos.

Los dos análisis mencionados se llevan a cabo mediante la exposición de los datos en diferentes tablas, numeradas de 3-4 a 3-12 para los datos disponibles y 3-13 a 3-21 para los no disponibles, de manera que ello permitan una fácil comparación con el fin de evaluar, aparte de la idoneidad de su aplicación para la delimitación de los perímetros de protección de la captación con declaración de aprovechamiento para el Balneario de Laias, la mayor o menor posibilidad de su aplicación futura en función de los trabajos requeridos en cada caso, y consiguientemente de las necesidades económicas.

Sin embargo, existen casos en los que existe una información previa que es posible utilizar pero que es claramente insuficiente para el objetivo de la delimitación de perímetros de protección. Se ha tratado de reflejar esta circunstancia también en las tablas (de datos disponibles y no disponibles), haciendo en cada caso hincapié en los aspectos en los que hay una clara necesidad de ampliación de la información disponible.

De manera similar se ha procedido en el caso de la posibilidad de aplicación de la metodología para la protección de la cantidad del recurso hidrotermal, expuesta en el apartado 2.10, y que queda recogida en las tablas 3-22 y 3-23 respectivamente para los datos existentes y no disponibles, lo que puede indicar cuál es la mejor aproximación para llevar a cabo esta protección.

Finalmente, en el apartado 4, se lleva a cabo una propuesta que contempla las actividades mínimas imprescindibles y complementarias a éstas que es necesario realizar en un futuro para abordar la delimitación de estos perímetros de protección basándose en metodologías específicas para medios fisurados.

Con este objetivo se considera necesario efectuar un análisis comparativo de los resultados obtenidos con esos métodos con el objetivo de definir una metodología que pueda ser aplicada de manera generalizada a las captaciones

de aguas minerales y termales en Galicia, detallando los estudios a efectuar para obtener la información requerida sistematizando esta.

Además sería conveniente su aplicación en otras zonas piloto, como podría ser el Balneario de Lugo, en el núcleo urbano de dicha ciudad y otras a precisar, para optimizar al máximo la precisión y aplicabilidad de la metodología propuesta previamente a su aplicación generalizada e todo el territorio de la Comunidad.

3.1. Características de la zona seleccionada. Balneario de Laias

Como información previa para el presente análisis se parte de los datos tomados de :

- Informe elaborado por la empresa Geotecnia y Cimientos, S.A. (GEOCISA, 1999), encargado a dicha empresa por Gestión de Balnearios, S.L.
- Cartografía temática, geológica e hidrogeológica, elaborada y publicada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), a diferentes escalas.
- Mapas de cultivos y aprovechamientos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en su página web: <http://www.mapya.es/>
- Datos del Instituto Nacional de Estadística actualizados a través de su página web <http://www.ine.es>
- Página web de la Consellería de Política Territorial, Obras Públicas e Vivenda de la Xunta de Galicia <http://www.xunta.es/conselle/ot/index.htm>
- Página web de la empresa concesionaria del aprovechamiento de los recursos hidrotermales de Laias <http://www.comerciofacil.com/balneatermalweb/index.htm>
- Boletín Oficial del Estado

Aparte de la información referida como base para la elaboración de este informe existe una serie de tres estudios originados a partir de la estimación, por parte de la Consellería de Industria y Comercio de la Xunta de Galicia, de la necesidad de una política de promoción de las aguas hidrominerales para su aprovechamiento cuyo punto de partida había de ser el conocimiento, estado actual y protección de las mismas. Estos tres estudios son:

- “Estudio de Evaluación del Estado Actual de las Aguas Minerales y de Bebida Envasada en la Comunidad Autónoma de Galicia. 1ª Fase”.
- “Estudio de Análisis Comparativo con la Comunidad Económica Europea sobre las Aguas Minerales y de Bebida Envasada en la Comunidad Autónoma de Galicia. 2ª Fase”.
- “Evaluación de las Aguas Minerales de la Comunidad Autónoma de Galicia. 3ª Fase”, y su Edición Divulgativa.

3.1.1. Marco geográfico y población

El Balneario de Laias está situado en la unidad poblacional o parroquia de Laias dentro del término municipal de Cenlle en la provincia de Orense. Concretamente se localiza en la Carretera N-120, en el km 585,5, entre Orense y Vigo. Está situado entre los ríos Miño, al sur y sudeste, y Avia, al oeste formando ambos los límites del término municipal (figura 3-1).

Se trata de un pequeño municipio (29 km²), que forma parte de la Comarca del Ribeiro, formado por diez parroquias (Barbantes, Cenlle, Esposende, Laidas, Osmo, Pena, Razamonde, Sadurnín, Trasariz y Vilar de Rei), cuya capital es Xuvín.

La N-120 que sigue el curso del río Miño, tres carreteras locales y la línea de ferrocarril Orense-Vigo, que cuenta con una estación en Barbantes, constituyen sus principales vías de acceso.

La población total del municipio de Cenlle en el año 2003 (INE, 2004) era de 1601 habitantes, de los cuales 251 corresponden a la parroquia de Laidas, como se observa en la figura (3-2).



Figura 3-1: Situación de la zona de estudio. Balneario de Laidas.

3.1.2. Marco geológico

Geológicamente la zona en la que se ubica el Balneario de Laidas pertenece al Dominio Esquistoso de Galicia Tras Os Montes de la zona Centroibérica del Macizo Ibérico.

Cartográficamente la zona en la que se localiza el aprovechamiento hidrotermal queda recogida en:

- Mapas geológicos de la serie MAGNA, escala 1:50.000, números:
 - 187 de Orense (IGME, 1974). Disponible en formato JPEG.
 - 225 de Ribadavia (IGME, 1974 b). Disponible en formato JPEG.
- Mapa geológico a escala 1:200.000 número 17 de Orense/Verín (IGME, 19__) disponible en diferentes formatos informáticos MXD, PMF, PDF y JPEG).

Entidad poblacional: se compone de los códigos de entidad colectiva, entidad singular y núcleo o diseminado; cada uno de ellos

Municipio	Código de unidad poblacional	Nombre de la Unidad Poblacional	Población Total	Varones	Mujeres						
025 Cenlle	00 00 00	CENLLE	1.601	754	847	32 Ourense	025 Cenlle	05 05 01	PAZOS ERMOS	36	14
025 Cenlle	01 00 00	CENLLE (SANTA MARIA)	315	149	166	32 Ourense	025 Cenlle	05 06 00	ROUCOS	36	15
025 Cenlle	01 01 00	CENLLE	251	120	131	32 Ourense	025 Cenlle	05 06 01	ROUCOS	36	15
025 Cenlle	01 01 01	CENLLE	246	118	128	32 Ourense	025 Cenlle	05 06 99	*DISEMINADO*		
025 Cenlle	01 01 99	*DISEMINADO*	5	2	3	32 Ourense	025 Cenlle	05 07 00	SAN LORENZO		
025 Cenlle	01 02 00	NAZARA	12	7	5	32 Ourense	025 Cenlle	05 07 99	*DISEMINADO*		
025 Cenlle	01 02 99	*DISEMINADO*	12	7	5	32 Ourense	025 Cenlle	06 00 00	RAZAMONDE (SANTA MARIA)	192	87
025 Cenlle	01 03 00	PENA (A)	15	5	10	32 Ourense	025 Cenlle	06 04 00	XUBIN	73	31
025 Cenlle	01 03 99	*DISEMINADO*	15	5	10	32 Ourense	025 Cenlle	06 04 01	XUBIN	65	28
025 Cenlle	01 04 00	PEREIRO (O)	2	2		32 Ourense	025 Cenlle	06 04 99	*DISEMINADO*	8	3
025 Cenlle	01 04 99	*DISEMINADO*	2	2		32 Ourense	025 Cenlle	06 07 00	RAZAMONDE	119	56
025 Cenlle	01 05 00	QUINTA (A)	14	5	9	32 Ourense	025 Cenlle	06 07 01	RAZAMONDE	114	54
025 Cenlle	01 05 99	*DISEMINADO*	14	5	9	32 Ourense	025 Cenlle	06 07 99	*DISEMINADO*	5	2
025 Cenlle	01 06 00	TORRE (A)	21	10	11	32 Ourense	025 Cenlle	07 00 00	SADURNIN (SAN XOAN)	127	65
025 Cenlle	01 06 01	TORRE (A)	21	10	11	32 Ourense	025 Cenlle	07 03 00	SAA	30	15
025 Cenlle	02 00 00	ESPOSENDE (SANTA MARIÑA)	110	52	58	32 Ourense	025 Cenlle	07 03 01	SAA	30	15
025 Cenlle	02 03 00	ESPOSENDE	110	52	58	32 Ourense	025 Cenlle	07 04 00	SADURNIN	50	25
025 Cenlle	02 03 01	ESPOSENDE	110	52	58	32 Ourense	025 Cenlle	07 04 01	SADURNIN	50	25
025 Cenlle	03 00 00	LAIAS (SANTA BAIA)	251	111	140	32 Ourense	025 Cenlle	07 05 00	CHAVOLAS (AS)	47	25
025 Cenlle	03 09 00	LAIAS	251	111	140	32 Ourense	025 Cenlle	07 05 01	CHAVOLAS (AS)	47	25
025 Cenlle	03 09 01	LAIAS	251	111	140	32 Ourense	025 Cenlle	08 00 00	TRASARIZ (SANTIAGO)	97	50
025 Cenlle	04 00 00	OSMO (SAN MIGUEL)	79	40	39	32 Ourense	025 Cenlle	08 04 00	TRASARIZ	97	50
025 Cenlle	04 06 00	OSMO	22	9	13	32 Ourense	025 Cenlle	08 04 01	TRASARIZ	90	47
025 Cenlle	04 06 01	OSMO	20	8	12	32 Ourense	025 Cenlle	08 04 99	*DISEMINADO*	7	3
025 Cenlle	04 06 99	*DISEMINADO*	2	1	1	32 Ourense	025 Cenlle	09 00 00	VILAR DE REI (SAN MIGUEL)	122	58
025 Cenlle	04 07 00	PIÑEIRO	6	3	3	32 Ourense	025 Cenlle	09 03 00	CIMA DE VILA	62	27
025 Cenlle	04 07 99	*DISEMINADO*	6	3	3	32 Ourense	025 Cenlle	09 03 01	CIMA DE VILA	49	20
025 Cenlle	04 10 00	RIOBO	51	28	23	32 Ourense	025 Cenlle	09 03 99	*DISEMINADO*	13	7
025 Cenlle	04 10 01	RIOBO	36	19	17	32 Ourense	025 Cenlle	09 04 00	LAMA (A)	38	18
025 Cenlle	04 10 99	*DISEMINADO*	15	9	6	32 Ourense	025 Cenlle	09 04 01	LAMA (A)	38	18
025 Cenlle	05 00 00	PENA (A) (SAN LORENZO)	162	75	87	32 Ourense	025 Cenlle	09 05 00	VILAR DE REI	22	13
025 Cenlle	05 02 00	COEDO (O)	17	8	9	32 Ourense	025 Cenlle	09 05 01	VILAR DE REI	22	13
025 Cenlle	05 02 01	COEDO (O)	17	8	9	32 Ourense	025 Cenlle	10 00 00	BARCA DE BARBANTES (A) (SANTO ANTONIO)	146	67
025 Cenlle	05 03 00	CUÑAS	56	29	27	32 Ourense	025 Cenlle	10 01 00	BARCA DE BARBANTES (A)	146	67
025 Cenlle	05 03 01	CUÑAS	53	28	25	32 Ourense	025 Cenlle	10 01 01	BARCA DE BARBANTES (A)	146	67
025 Cenlle	05 03 99	*DISEMINADO*	3	1	2	32 Ourense	025 Cenlle	10 01 01	BARCA DE BARBANTES (A)	146	67
025 Cenlle	05 04 00	LENTILLE	17	9	8	32 Ourense	025 Cenlle	10 01 99	*DISEMINADO*		
025 Cenlle	05 04 01	LENTILLE	17	9	8	32 Ourense	025 Cenlle				
025 Cenlle	05 05 00	PAZOS ERMOS	36	14	22	32 Ourense	025 Cenlle				

En concreto la zona en la que aparecen los manantiales objeto de este estudio (figuras 3-3 y 3-4) está compuesta por materiales del zócalo cristalino hercínico, pertenecientes al macizo de Carballino-Allariz, representados por granitos adamellíticos de naturaleza anatética vinculados a rocas de tipo migmatitas y gneises, así como por diques de aplita, pegmatita y cuarzo, cubiertos localmente por depósitos cuaternarios y de origen antrópico. Éstos granitos son de intrusión sincinemática y postcinemática en la fase tardía de la fase hercínica y en la etapa tardía del Hercínico.

Los granitos adamellíticos de tonos claros, son de grano medio a grueso con cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, moscovita y biotita y como minerales accesorios circón, granate y turmalina.

Al sur de Laias aparecen formaciones, correspondientes en sentido estricto al complejo Galicia Tras Os Montes compuestas por esquistos, esquistos feldespáticos, esquistos grafitosos, paragneises y metavulcanitas.

También existe un dique de lamprófido al NW del balneario compuesto por diorita de grano fino con dirección SE-NO.

Fracturación

El análisis de la fracturación existente (GEOCISA, 1999) realizado mediante estudio de fotografía aérea y su reflejo en un esquema en superficie, indica la existencia de 3 sistemas de fracturas diferenciables (figura 3-5) que presentan las siguientes características:

- Sistema de dirección N10-30E. Son las de mayor desarrollo y tamaño, con presencia importante en el Monte de San Trocado (posible área de alimentación). Aguas arriba del Miño éste circula en una dirección N20E probablemente a favor de una o varias de estas fracturas. Las manifestaciones termales Laias, Laias Vía y Laias Vía II de la margen derecha del Miño se disponen también según esta dirección.
- Sistema de dirección N160E. Muy visibles en el Monte de San Trocado.
- Sistema de dirección N100E. Posiblemente en algún tramo el Miño aprovecha su trazado para encajarse (se ha propuesto que la surgencia de Laias puede encontrarse sobre una de ellas).

En concreto la zona en la que aparecen los manantiales objeto de este estudio (figuras 3-3 y 3-4) está compuesta por materiales del zócalo cristalino hercínico, pertenecientes al macizo de Carballino-Allariz, representados por granitos adamellíticos de naturaleza anatética vinculados a rocas de tipo migmatitas y gneises, así como por diques de aplita, pegmatita y cuarzo, cubiertos localmente por depósitos cuaternarios y de origen antrópico. Éstos granitos son de intrusión sincinemática y postcinemática en la fase tardía de la fase hercínica y en la etapa tardía del Hercínico.

Los granitos adamellíticos de tonos claros, son de grano medio a grueso con cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, moscovita y biotita y como minerales accesorios circón, granate y turmalina.

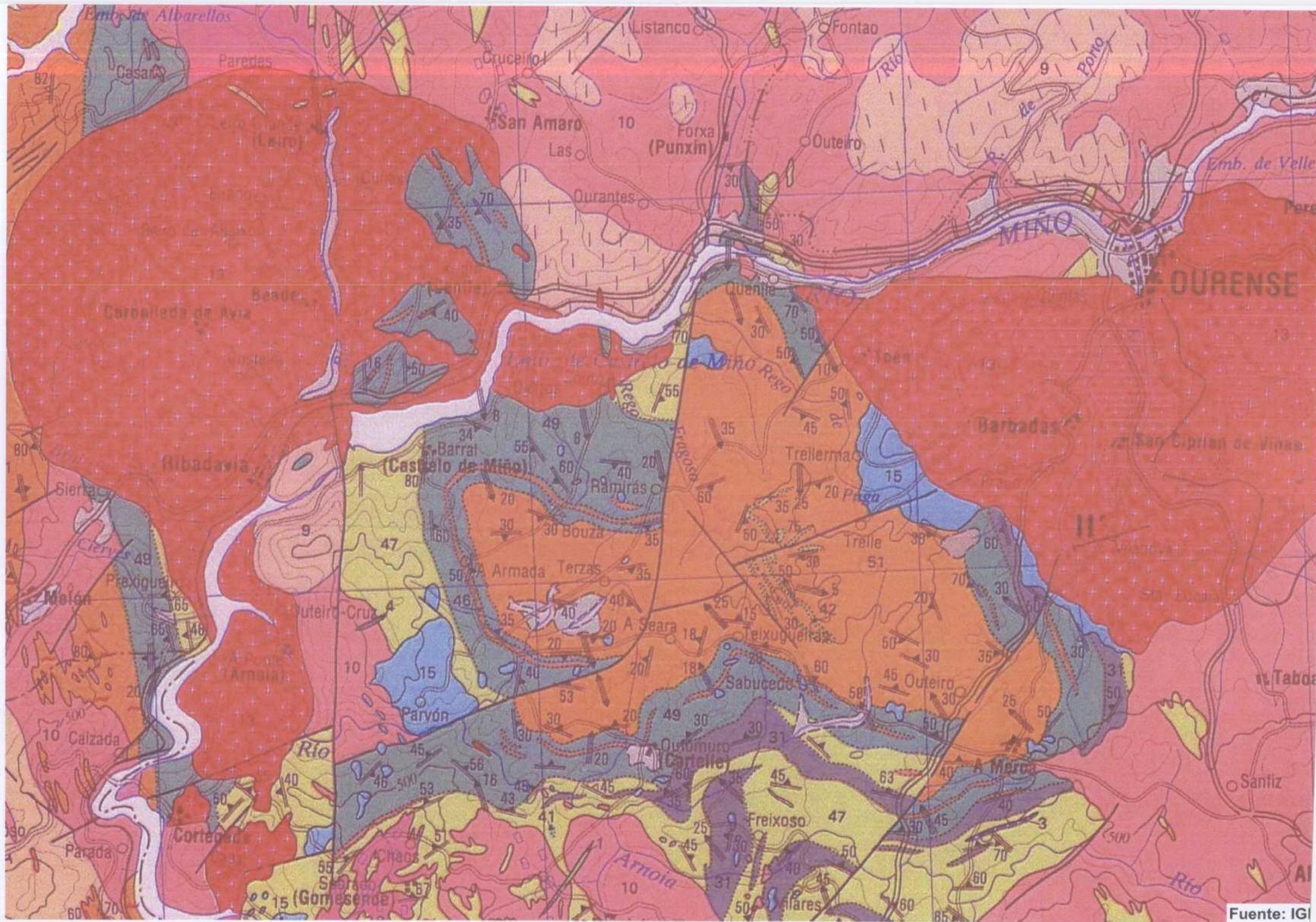
Al sur de Laias aparecen formaciones, correspondientes en sentido estricto al complejo Galicia Tras Os Montes compuestas por esquistos, esquistos feldespáticos, esquistos grafitosos, paragneises y metavulcanitas.

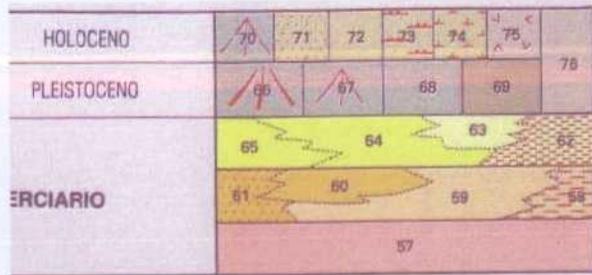
También existe un dique de lamprófido al NW del balneario compuesto por diorita de grano fino con dirección SE-NO.

Fracturación

El análisis de la fracturación existente (GEOCISA, 1999) realizado mediante estudio de fotografía aérea y su reflejo en un esquema en superficie, indica la existencia de 3 sistemas de fracturas diferenciables (figura 3-5) que presentan las siguientes características:

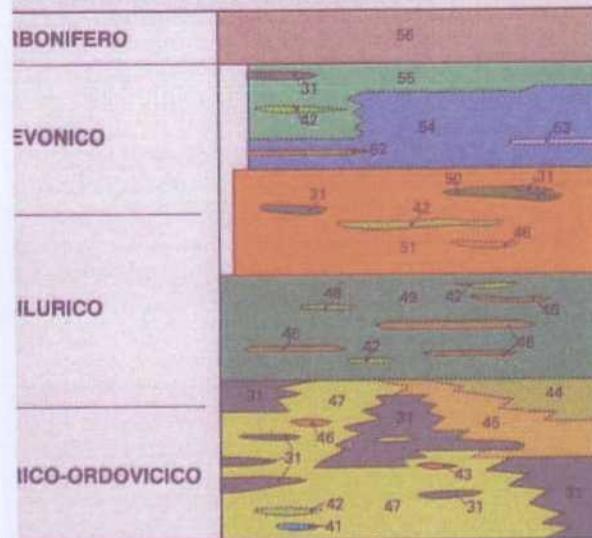
- Sistema de dirección N10-30E. Son las de mayor desarrollo y tamaño, con presencia importante en el Monte de San Trocadero (posible área de alimentación). Aguas arriba del Miño éste circula en una dirección N20E probablemente a favor de una o varias de estas fracturas. Las manifestaciones termales Laias, Laias Vía y Laias Vía II de la margen derecha del Miño se disponen también según esta dirección.
- Sistema de dirección N160E. Muy visibles en el Monte de San Trocadero.
- Sistema de dirección N100E. Posiblemente en algún tramo el Miño aprovecha su trazado para encajarse (se ha propuesto que la surgencia de Laias puede encontrarse sobre una de ellas).





- 76 Cuaternario indiferenciado.
- 75 Depósitos eluviales.
- 74 Depósitos palustres. Limos, turbas, arcillas y arenas.
- 73 Aluvial. Canales anastomosados. Arenas y limos.
- 72 Aluvial. Canales trenzados o «braided». Arenas, gravas y cantos.
- 71 Aluvial. Canales meandriformes y llanura de inundación. Arenas y arcillas.
- 70 Abanicos aluviales. Arenas, arcillas y cantos.
- 69 Depósitos glaciares y fluvio-glaciares.
- 68 Terrazas. Cantos y arenas.
- 67 Abanicos aluviales. Arenas, arcillas y cantos.
- 66 Glacia degradados. Cantos, gravas y arenas.

**ALICIA-TRAS-OS-MONTES
QUISTOSO DE GALICIA-TRAS-OS-MONTES**



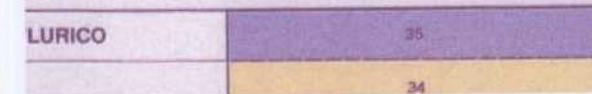
- CUENCA DE MONFORTE**
- 65 Conglomerados dispuestos en canales.
- 64 Arenas dispuestas en canales y arcillas.
- 63 Arcillas rojizas, margas y calizas.
- 62 Arcillas verdes, margas y calizas.
- CUENCA DE MACEDA**
- 61 Arena y arcilla gris (Miembro de Corno).
- 60 Arcilla gris con niveles bituminosos y arena gruesa (Miembro de la Vega).
- 59 Arcilla rojo-grisácea, gravas y arenas (Miembro de los Milagros).
- 58 Arcilla y arenas finas rojo intenso (Miembro de Pías).
- CUENCA DE QUIROGA**
- 57 Arenas, arenas arcillosas, arcillas y cantos.
- 56 Brecha sedimentario, arenas y niveles carbonosos.
- GRUPO DE LALIN-FORCAREI**
- 55 Esquistos y paragneises.
- 54 Esquistos y anfíbolitas.
- 53 Ortogneises peralcalinos.
- 52 Ortogneises.

**ORO-IBERICA
ANTICLINORIO DEL «OLLO DE SAPO»**



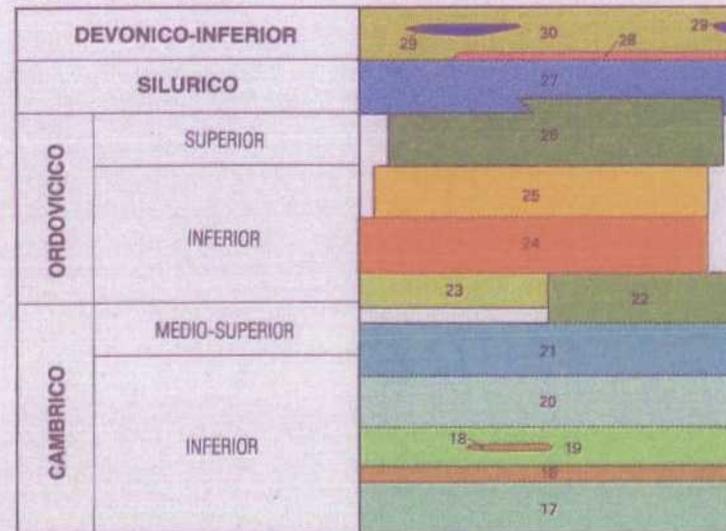
- GRUPO DE PARAÑO**
- 51 Esquistos, filitas, limolitas y gresuvas.
- 31 Metavulcanitas ácidas.
- 50 Traquitas.
- 42 Cuarcitas.
- 46 Liditas.
- GRUPO DE NOGUEIRA**
- 48 Esquistos, esquistos grafitosos, filitas, ampelitas y liditas.
- 42 Cuarcitas.
- 48 Liditas y ampelitas.
- 48 Mármoles.

OS MONTES DEL INVERNADEIRO



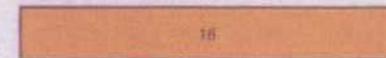
- GRUPO DE SANTABAIA**
- 47 Esquistos, esquistos feldespáticos, paragneises y metavulcanitas.
- 31 Metavulcanitas ácidas.
- 46 Ampelitas y liditas.
- 45 Areniscas y filitas.
- 44 Esquistos micáceos y paragneises.

**ZONA ASTUROCCIDENTAL-LEONESA
DOMINIO DEL CAUREL**



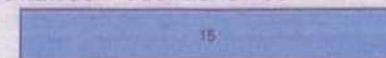
- 27 Pizarras con cloritoide y ampelitas. CA GARGANTA.
- 25 Pizarras grises y negras. PIZARRAS DE
- 24 CUARCITA ARMORICANA.
- 39 Pizarras grises con intercalaciones cuar LOS MONTES.
- 38 Cuarcitas feldespáticas.
- PORFIROIDE DEL «OLLO DE SAPO»**
- 37 Gneises microglandulares, cuarcitas fel esquistos «OLLO DE SAPO» DE GRAN
- 36 Gneises glandulares con megacristales «OLLO DE SAPO» DE GRANO GRUESO
- 35 Filitas y ampelitas.
- 34 Pizarras grises y negras.
- 33 Cuarcitas, areniscas y pizarras.
- 32 Filitas, cuarcitas y ampelitas con metavl intercaladas.
- 31 Metavulcanitas ácidas.
- 30 Pizarras grises. CAPAS DE SECEDA.
- 29 Calizas.
- 28 Cuarcitas.
- 27 Pizarras con cloritoide y ampelitas. CAP GARGANTA.

ROCAS GRANITICAS PREHERCINICAS



- 26 CALIZA DE LA AQUIANA.
- 25 Pizarras grises y negras. PIZARRAS DE L
- 24 CUARCITA ARMORICANA.
- 23 Pizarras grises. PIZARRAS DEL SOLDON
- 22 Pizarras grises y areniscas. CAPAS DE VI
- 21 CALIZA DE VEGADEO.

**ROCAS GRANITICAS HERCINICAS
POSTCINEMATICAS
GRANITOIDES CALCOALCALINOS Y SUBALCALINOS**



- 20 Pizarras, areniscas y ampelitas. CAPAS D
- 19 PIZARRAS DE CANDANA.
- 18 Calizas.
- 17 CUARCITA INFERIOR DE CANDANA.
- 16 Ortogneises glandulares.

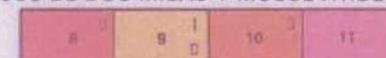


- 15 Pórfidos granodioríticos biotítico-anfíbóli abundantes microenclaves.
- 14 Granitos granodioritas biotítico-anfíbóli a medio.

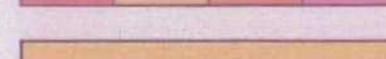


- 13 Granitos biotíticos y granodioritas biotiti Facies con megacristales de Fto. K. + + 2 medio, + + Zona de grano grueso porfid porfidica con algo de moscovita y difere leucocráticos.

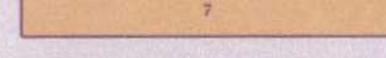
**SINCINEMATICAS
GRANITOS PERALUMINICOS DE DOS MICAS Y MOSCOVICITOS**



- 12 Granitos de dos micas.
- 11 Leucogranitos moscovíticos.
- 10 Granitos de dos micas moderadamente Facies porfidica.



- 9 Granitos de dos micas muy leucocrático grandes biotitas («Ala de mosca»). □ Fac
- 8 Granitos predominantemente biotíticos. porfidica.



- 7 Granitoide inhomogéneo.

GRANITOIDES CALCOALCALINOS (GRANITOIDES PRECOCES)



- 6 Granitos y granodioritas predominantemente Facies con megacristales de Fto. K.
- 5 Tonalitas y cuarzodioritas.

ROCAS FILONIANAS

- 4 Pegmatitas y apilitas.
- 3 Pórfidos y microgranitos porfidicos.

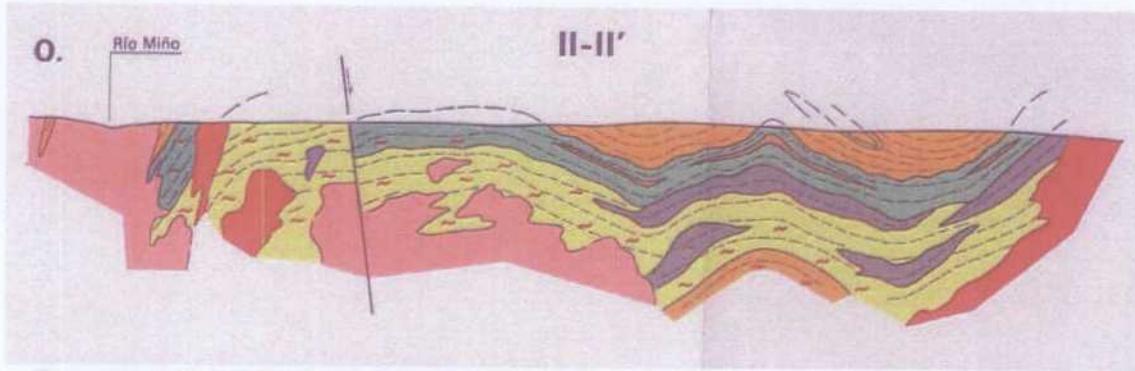


Figura 3-4: Corte geológico del área de estudio



Figura 3-5: Análisis de la fracturación en el entorno del Balneario de Laias

3.1.3. Marco hidrogeológico

La zona de estudio está ubicada en la Cuenca Hidrográfica del Norte (01), si bien el entorno de las captaciones de Laias, no se considera incluido en ninguna Unidad Hidrogeológica (figura 3-6).



Figura 3-6: Marco hidrogeológico

extensos y de baja productividad, aunque pueden tener localmente un gran interés. Las formaciones acuíferas modernas pueden recubrir en ciertos casos acuíferos cautivos productivos. (IGME, 2000).

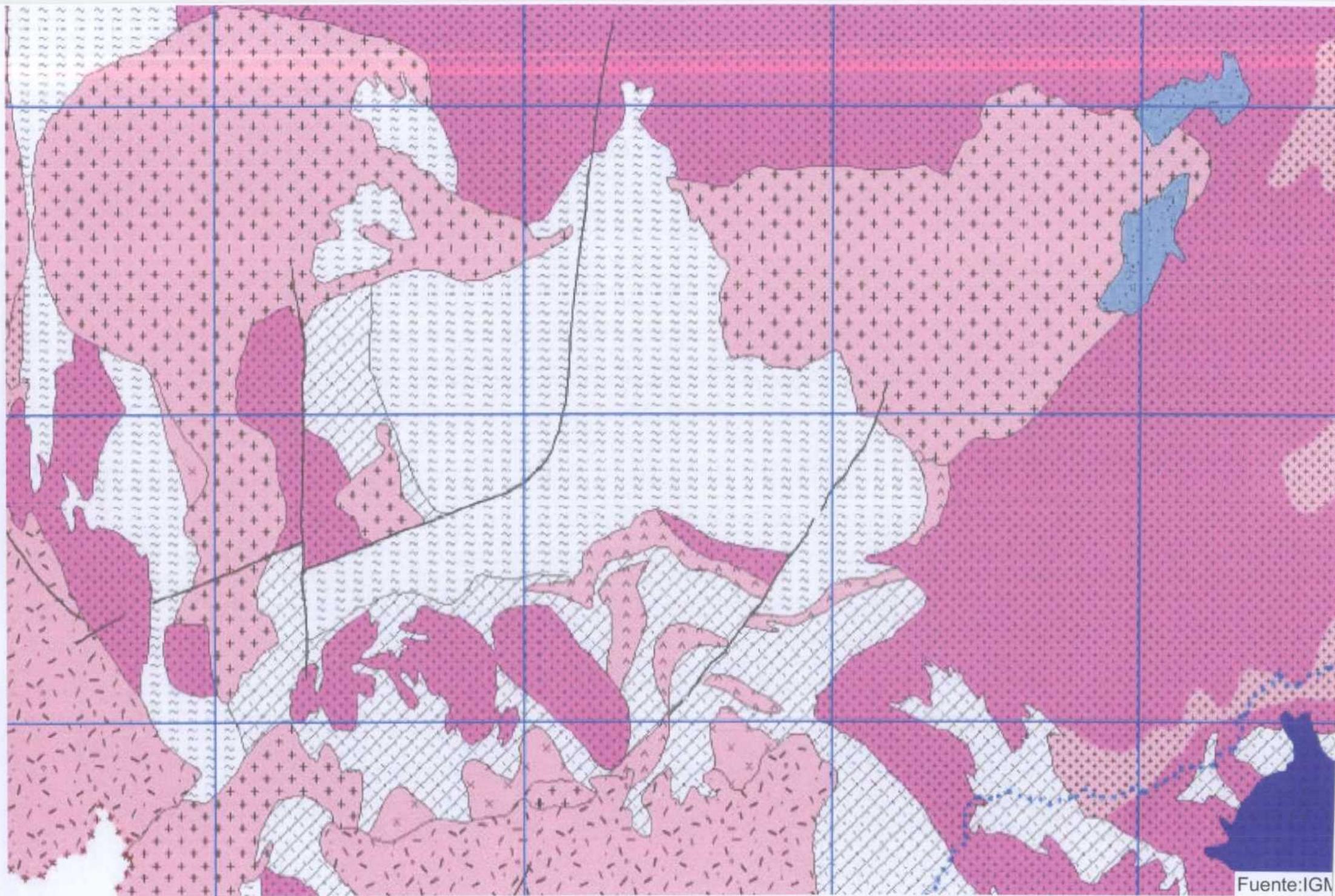
3.1.4. Hidrogeología e hidroquímica

Se dispone de la cartografía hidrogeológica de la Comunidad Autónoma de Galicia a escala 1:200.000, que sin embargo por la escala resulta excesivamente esquemática para el propósito de la delimitación de perímetros de protección de las captaciones de recursos hidrotermales, si bien es de gran utilidad como primera aproximación (figura 3-7).

En el entorno del manantial Laias nº 38, surgencia principal de la concesión de aprovechamiento no existe cartografía hidrogeológica de detalle. Asimismo tampoco existe cartografía detallada de las posibles zonas de recarga en las que se supone la infiltración del agua.

El entorno más próximo de las captaciones está constituido por materiales cuaternarios de origen fluvial, terrazas y depósitos aluviales, así como depósitos de relleno de origen antrópico, en todos los cuales es esperable una gran heterogeneidad en los parámetros hidrogeológicos.

El contexto hidrogeológico en el que aparecen las surgencias hidrotermales de Laias corresponde a formaciones generalmente impermeables o de muy baja permeabilidad, que pueden albergar acuíferos superficiales por alteración o fisuración, en general poco



Fuente: IGM

Mapa hidrogeológico de la zona de estudio.

LEYENDA de la FIGURA 3-7.

LEYENDA LITOLOGICA

CUATERNARIO INDEFERENCIADO (coluvial, aluvial, fluvio-glacial y costero)

CUATERNARIO ALUVIAL (fluvial, aluvial, fondos de valle y canales)

CUATERNARIO TERRAZAS : cantos y arenas

CUENCAS Terciarias: gravas, arenas, arcillas, arcillas arenosas

PIZARRAS, CUARCITAS, ARENISCAS

PIZARRAS (En ocasiones con intercalaciones de calizas)

ESQUISTOS (esquistos con pagueises, limolitas, anfibolitas y gruvacas)

CUARCITAS

CALIZAS Y DOLOMIAS

ESQUISTOS Y GNEISES

ROCAS BASICAS : Ultramáficas anfibolitas, metabasitas, metagabros, eclogitas, etc.

VULCANITAS ACIDAS

ARENISCAS

GNEISES : gneis glandular (Ojo de Sapo), gneis de dos micas, bandeados, etc.

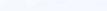
PIZARRAS, ARNISCAS, ESQUISTOS Y GNEISES

MIGMATITAS (granitoide inhomogeneo)

GRANITOS CALCOALCALINOS : granodioritas y granitos biotiticos

GRANITOS ALCALINOS : granitos de dos micas

SIMBOLOS

	FALLA
	FRACTURA INVERSA O CABALGAMIENTO
	ANCLINAL (Anticlinorio)
	SINCLINAL (Sinclinorio)
	DIQUES : CUARZO, PEGMATITA Y PORFIDOS
	SUBVISORIA CUENCA

LEYENDA HIDROGEOLOGICA



TIPO DE PERMEABILIDAD	GRADO DE PERMEABILIDAD	DESCRIPCION	LITOLOGIA	CA EX
POROSIDAD INTERGRANULAR	ALTA - MEDIA	Formaciones extensas (acuíferos regionales) o locales	Depósitos fluviales y depósitos Terciarios	
	ALTA - MEDIA	Formaciones extensas, discontinuas o locales	Aluviales, fluviales, costeros y depósitos Terciarios	
	BAJA	Formaciones extensas, discontinuas o locales	Depósitos Terciarios y Cuaternarios indiferenciados	
FISURACION Y KARSTIFICACION	ALTA - MEDIA	Formaciones extensas, discontinuas o locales	Calizas y dolomías	
	MEDIA - BAJA		Cuarzos	
POROSIDAD INTERGRANULAR Y FISURACION	MEDIA - BAJA	Formaciones extensas, discontinuas o locales	Granitos muy alterados	
	BAJA		Granitos escasos poco alterados, granitos calcálicos, gneises, migmatitas y metavulcanitas	
POROSIDAD INTERGRANULAR Y FISURACION	MUY BAJA - IMPERMEABLE		Pizarras, esquistos, rocas básicas, esquistos gneises y depósitos Terciarios muy acuíferos	

La captación declarada objeto de aprovechamiento de aguas minero-medicinales, denominada Manantial Laias nº 38, consiste en un pozo de escasa profundidad. El uso inicial del agua era para un lavadero ya desaparecido, posteriormente su uso fue el nuevo lavadero y el balneario construido en el año 1977. Se trata de la surgencia principal del conjunto de la zona, que debido al relleno efectuado por la construcción de la presa de Castrelo do Miño fue recrecido. Se encuentra protegido por una caseta cerrada. Presenta una profundidad de 3,6 m, con un brocal rectangular de 1,2-0,5 m, y se encuentra instalado con dos bombas de aspiración que extraen sendos caudales de 1,9 L/s y 2,2 L/s.

En el entorno y junto a éste existen dos pozos contiguos, revestidos por anillos de hormigón de recrecimiento de 1 m y 0,9 m de diámetro y de 3,63 m y 3,48 m de profundidad respectivamente, cubiertos por una arqueta de registro. Su caudal surgente conjunto es de 0,23 L/s (10/10/99). Este caudal es vertido al río Miño por una tubería.

Existen también dos sondeos inclinados, perforados para el abastecimiento del balneario que data de 1977. Estos están localizados en el interior de una caseta y actualmente en desuso. Su profundidad inicial de 30 m, se ha visto reducida a 16,74 m el primero y obstruido a 2 m el segundo. Los caudales conjuntos son de 0,18 L/s.

Otro sondeo junto al balneario anterior, drenado al Miño tiene un diámetro de perforación de 120 mm y una profundidad de 36,4 m. Su caudal es de 0,92 L/s (10/10/99).

Finalmente y también en este entorno próximo, junto al nuevo balneario se localiza un sondeo de geotermia realizado por el IGME, originalmente de más de 200 m y actualmente obstruido a 33,25 m.

En conjunto las manifestaciones de aguas termales de Laias corresponde químicamente a aguas bicarbonatadas sódicas con una elevada concentración de los componentes indicadores de su carácter termal como son SiO_2 , Cl^- , NH_4 , Li^+ (GEOCISA, 1999).

La sílice presenta valores superiores hasta en un 60 % a los habituales (entre 1 y 40 mg/L), los fluoruros aparecen en concentraciones superiores a 13 mg/L (generalmente menos de 1 mg/L), el sulfhídrico alcanza hasta 24,3 mg/L (según la U. de Santiago) y produce un característico olor a huevos podridos.

Aparte de los puntos anteriormente analizados se ha descrito un inventario de puntos de agua, basado en diversas fuentes (GEOCISA, IGME, ...) que comprende un total de 83 puntos (Tabla 3-1). Sin embargo se trata de una recopilación de datos de ámbito excesivamente regional, realizado a partir de la toma de datos en el año 99 (GEOCISA, 1999), complementado con datos existentes de otras fechas, y por lo tanto no correlacionables para las diferentes captaciones.

Además de la dificultad en dicha correlación, hay que tener en cuenta que existen notables diferencias entre los puntos asociados al termalismo (ver fichas en anexo) y los que no lo están, siendo los primeros correspondientes al entorno del balneario y posiblemente con una relación limitada si no nula con el resto de puntos inventariados.

Laías	579910	4686745	95					0,414	104	7,7	49,1	Granito	Bañero antiguo	Termal, sondeo incinado 60". Es uno	
Laías	579920	4686745	95					0,414	284	7,7	45	Granito	Sin uso	Termal. Es uno de los manantiales	
Laías	579920	4686744	95					0,414	405	7,7	47,6	Granito	Sin uso	Termal. Es uno de los manantiales	
Laías	579915	4686749	95					3,3027	84	8,4	43,4	Granito	Sin uso	Termal. Los caudales	
Barbantes Estación	580895	4687435	140					0,43776	100	7,2	15,4	Granito	Fuente		
Laías	580059	4686685	95	135		0,54	94,46		567	8	21,1	Granito	Sin uso	Termal Cegado a 1,35 m. Profundidad	
Laías	579900	4686750	95			0,75	94,25		83	6	21,5	Granito	Sin uso	Perforado para	
Laías	579925	4686732	94					0,8262	92	8,1	39,2	Granito	Drenaje	Supuestamente	
Laías	579920	4686730	94					3,3027	84	8,4	32,8	Granito	Drenaje	Supuestamente	
Barbantes Estación	581040	4687435	90									Granito	Riego		
Barbantes Estación	581060	4687385	90	260								Granito	Riego	Pozo tapado, no se conoce	
Barbantes Estación	581090	4687390	90	5	1100			2,287	120	8,3	4	Granito	Riego vivero	Pozo tapado, todos los datos	
Barbantes Estación	581093	4687389	90	5,8	1100	4,7	85,3			8	14,6	Granito	Sin uso	Uso para regar viveros	
Barbantes Estación	581110	4687350	90					0,54		7,5	5,4	Granito	Fuente	Es un manantial	
Laías	581000	4687205	89							8,5	38,8	Granito	Sin uso		
Laías	580890	4686860	88	1,40	1800	0,4	87,6			8,6	30,7	Granito	Sin uso		
Barbantes Estación	581285	4687460	89	4,44	1200	2,21	85,79			7,2	10,5	Granito	Riego		
Barbantes Estación	581375	4687380	88						450	7,6	5,1	Granito	Sin uso		
Barbantes Estación	581420	4687445	88	2,74	1030	1,2	86,8			9,4	9,3	Granito	Sin uso	Se trata de	
Barbantes Estación	581400	4688549	88	4,3	1600	1,65	86,35			6,8	10,5	Granito	Riego	Finca	
Barbantes Estación	581390	4688547	88	4,7	1000	1,92	86,08			6,5	6,5	Granito	Riego		
Barbantes Estación	580380	4687459	87	2,12		0,12	86,88			310	8,8	23,6	Granito	Sin uso	Termal. Pozo cegado, profundidad
Razamonte	578225	4687288	132					0,0558	775	6,6	13,9	Granito	Fuente		
Laías	580169	4687542	140					3,132	572	7,9	10,1	Granito	Lavadero público		
Laías	580185	4687745	170					0,216		6,5	13,22	Granito	Sin uso		
Troncoso	580906	4685954	131					1,3428	160	8,4	13	Granito	Desconocido		
Troncoso	579900	4686280	120						290	7,3	6,1	Granito	Sin uso		
Astariz	579459	4686370	120					0,36	290	6,4	12,7	Granito	Lavadero público		
Vide	578615	4686090	98					0,082	450	6	13,5	Granito	Fuente		
Oleiros	577020	4684790	90					1,188	330	6,2	9,8	Esquistos	Lavadero público	Muy	
Prado	577660	4686035	122					0,4608	440	6	13,2	Granito	Lavadero público	Muy cerca de fosa séptica	
Ventosela	573765	4685740	120					0,3906	120	7	14,7	Granito	Fuente	Pega	
Ribadavia	573582	4685828	135					0,6				Granito	Desconocido	Base	
Castrelo del Valle	576806	4684023	160					0,6				Esquistos	Desconocido	Base	
Castrelo del Valle	577769	4686011	135					0,1				Esquistos	Desconocido	Base	
Castrelo del Valle	579318	4684671	340					0,2				Esquistos	Abastecimiento urbano	Base	
Castrelo del Valle	575414	4685761	190					0,2				Esquistos	Lavadero público	Base	
Cenlle	576079	4685709	150					1,2				Granito	Abastecimiento urbano	Base	
Carvalleda de Avia	578304	4687312	190					0,2				Granito	Desconocido	Base	
Toen	585587	4687030	140					1,2				Granito	Abastecimiento urbano	Base	
Toen	583521	4687400	280					0,6				Granito	Abastecimiento urbano	Base	
Toen	582041	4686776	100					0,9				Granito	Desconocido	Base	
Celanova	574703	4677268	530					0,3				Granodiorita	Abastecimiento urbano	Base	
Celanova	575082	4676163	380					0,6				Granodiorita	Abastecimiento urbano	Base	
Amoeiro	585269	4694213	355					0,4	95			Granito	Sin uso	Base	
Punxín	582630	4692175	115					3,6	228			Granito	Sin uso	Base	
Punxín	582876	4691617	112					0,2	214			Granito	Sin uso	Base	
Punxín	582627	4692225	110					0,3	218			Granito	Sin uso	Base	
Orense	583042	4689213	122	33				0,7	262			Granito	Abastecimiento urbano	Base	
Berán	571058	4688663	180					7,2	282		26-27	Granito	Minero medicinal no envasada	Sulfurosa.	
Barbantes Estación	581368	4688663	98					0,2	385			Granito	Sin uso	Arch	
Francelos	570104	4681032	77					3,6	332			Granito	Minero medicinal no envasada	No localizado	
San Amaro	570879	4679252	150					0,3			20	Granito	Minero medicinal no envasada	Fuente pública 1899	
Ribadavia	571102	4682094	120					0,1			15	Granito	Abastecimiento urbano	Dos manantiales de agua	
Castrelo de Miño	573046	4682366	100					0,1				Granito	Desconocido	Arch	
Castrelo de Miño	572970	4682663	87								60	Esquistos	Abastecimiento no urbano	Antaño pozas para baño	
San Andrés	573582	4685926	135					0,6				Granito	Desconocido	Arch	
Ventosela	572454	4684240	100								13	Granito	Abastecimiento urbano	Probable mezcla	
As Fontiñas	571308	4684317	80					0,1				Granito	Desconocido	Arch	
Vaiñas das Casas	570789	4685791	165					0,1				Granito	Desconocido	Arch	
Macendo	579443	4683748	110					0,1				Esquistos	Desconocido	Arch	
O Couso	577769	4686011	135					0,2				Granito	Desconocido	Arch	
Laías	580296	4687213	130					0,1				Granito	Abastecimiento urbano	Arch	
Vide	578500	4686142	105					0,4	302			Granito	Desconocido	Arch	
Laías	580024	4687246	125					0,1				Granito	Desconocido	Arch	
Vilacorva	573024	4671167	370					0,4				Granito	Desconocido	Arch	
Louredo	570952	4674225	180					0,7				Esquistos	Desconocido	Arch	
Arnoia	571656	4677165	500					0,7				Granito	Abastecimiento urbano	Arch	
Louredo	570668	4675147	380					10,8				Esquistos	Abastecimiento urbano	Arch	
O Viso	578737	4673185	330					0,3				Granito	Abastecimiento y ganadería	Arch	
Fonteblanca	576719	4671064	420					0,6				Esquistos	Abastecimiento urbano	Arch	
Sobrado	574936	4672613	435					0,3				Granito	Abastecimiento urbano	Arch	
Sobrado	574973	4671349	435									Esquistos	Desconocido	Arch	
O Gancelo	574703	4677268	500									Granodiorita	Abastecimiento urbano	Arch	
Mirós	581124	4671028	380										Desconocido	Arch	
Mirós	580895	4672969	360									Esquistos	Desconocido	Arch	
Arnoia	569470	4679110	70								15,8	Granito	Sin uso	Balneario de	
Arnoia	569470	4679110	70								16,3	Granito	Sin uso	Balneario de	
Arnoia	569470	4679110	70									Granito	Sin uso	Balneario de	

Es por tanto necesario llevar a cabo una actualización rigurosa del inventario, que permita a partir de la representación de dichos puntos en un mapa de superficie junto con los valores obtenidos realizar representaciones o mapas de isolíneas (isopiezas, isoconductividades,...) de los diferentes flujos existentes en el área que ofrezcan una visión de detalle y global de las aguas subterráneas de la zona.

Es notable la carencia de mapas de isopiezas, si bien se ha constatado que existe una afección al nivel de las captaciones en respuesta a las variaciones de nivel del embalse de Castrelo do Miño, propiciando en ocasiones que lleguen a ser surgentes por encima de los rellenos antrópicos.

En estudios precedentes (GEOCISA, 1999) se ha considerado la fracturación como la porosidad principal del acuífero granítico en profundidad. En función de la cartografía hidrogeológica existente (IGME, 2004) hay que destacar también que los granitos presentan además porosidad intergranular y los esquistos de la zona de estudio presentan porosidad intergranular y por fisuración. En ambos casos la existencia de porosidad intergranular se produce debido a la alteración de los materiales, en sus partes más superficiales, siendo el flujo por fracturas predominante en profundidad, con su lógica repercusión en los flujos existentes básicos para definir los perímetros de protección de las captaciones.

La permeabilidad es baja en los granitos, estimándose unos caudales entre 0,3 y 3 L/s, inferiores a aquellos empleados en la prueba de bombeo realizada por GEOCISA en el manantial Laias nº 38, y muy baja en los materiales esquistosos llegando a considerarse en algún caso como impermeables, en los que se calculan caudales de explotación menores de 0,3 L/s.

En la zona de estudio se han realizado (GEOCISA, 1999) ensayos de bombeo escalonados y de nivel constante con sus respectivas recuperaciones.

El ensayo de bombeo escalonado realizado el día dos de octubre de 1999 se llevó a cabo con dos caudales diferentes (4,16 L/s y 6,38 L/s con descenso a 6,06 L/s este último) y 45 minutos de duración. Mediante este ensayo:

- Se establece este último caudal como caudal de la prueba a caudal constante.
- Se evalúan las pérdidas de carga del pozo, de un 16 %, indicando por tanto que la eficacia de la captación es elevada.

No es posible, sin embargo y como sería conveniente para este estudio, evaluar la linealidad de la gráfica caudal/descenso como indicadora de la asimilabilidad del medio a uno de porosidad intergranular o por el contrario de porosidad por fracturación al tratarse de un ensayo con únicamente dos caudales. Para ello sería necesario al menos de un bombeo escalonado con tres caudales diferentes y con intervalos de tiempo semejantes.

Posteriormente, entre los días dos y cuatro de octubre de 1999, se llevó a cabo también un ensayo de bombeo, a caudal constante de 6,06 L/s, en la captación objeto del aprovechamiento y medidas en seis puntos de observación situados próximos a ella.

En conjunto el comportamiento de las gráficas descenso/tiempo de todos los puntos observados (excepto el denominado punto 8) ofrece morfologías similares en todos los casos, con un tramo de ascensos y descensos debidos a las oscilaciones del embalse (figura 3-8).

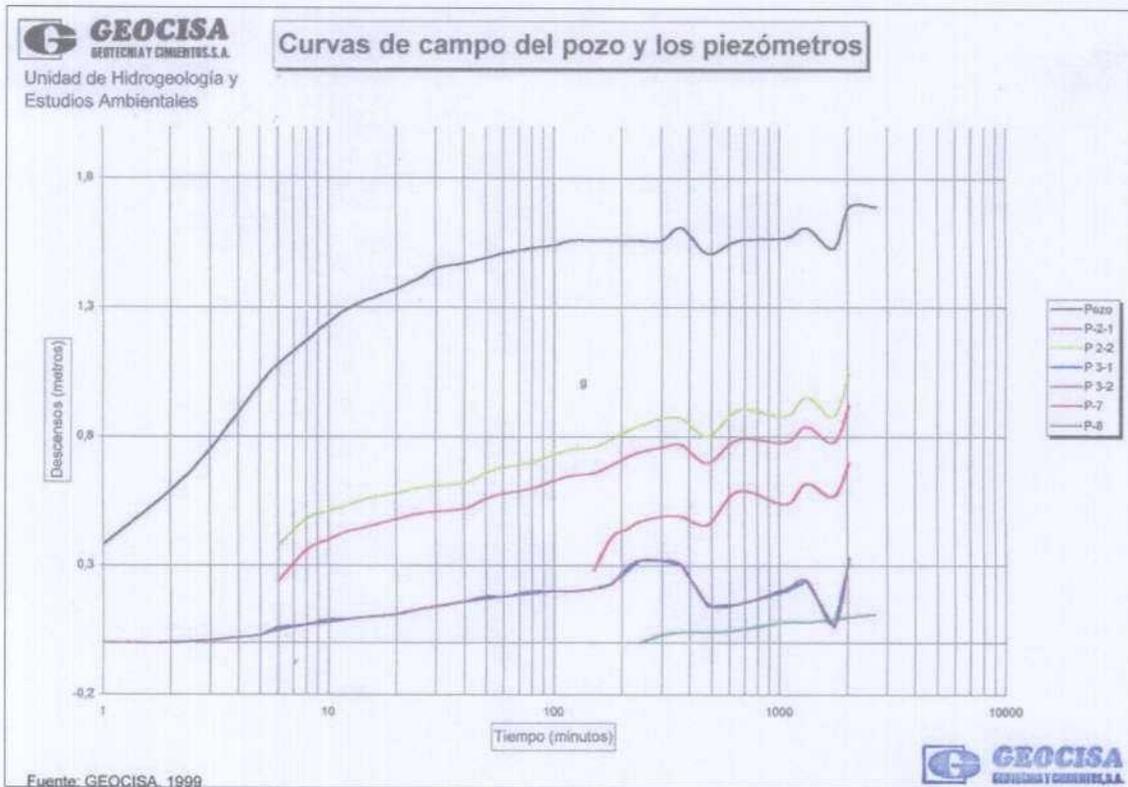


Figura 3-8: Evolución descensos tiempo durante el ensayo de bombeo en el punto de bombeo y puntos de observación

En principio las morfologías de este tipo indicarían un medio asimilable a uno de porosidad intergranular al no presentar inflexiones bruscas, sin embargo es posible que al ser el ensayo con puntos tan próximos a la captación solo sea indicativo de ese ámbito.

Las estimaciones de transmisividad y de coeficiente de almacenamiento, llevadas a cabo mediante el ensayo de bombeo de nivel constante indican los siguientes valores:

$T = 375 - 650 \text{ m}^2/\text{día}$, media $440 \text{ m}^2/\text{día}$, valor propuesto $400 \text{ m}^2/\text{día}$.

$S = 5 \cdot 10^{-3}$.

El análisis de la recarga (GEOCISA, 1999) realizado a partir de datos de pluviometría confeccionados para el Plan Hidrológico I, de la Cuenca Hidrográfica Norte y de la estación meteorológica de Orense, la lluvia útil acumulada calculada, los datos de escorrentía superficial del Instituto Nacional de Meteorología para cuencas cercanas, ofrece los resultados que se recogen en la tabla 3-2.

Tabla 3-2: Determinación de la lluvia infiltrada

	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul	Ago.
P	39	78	100	125	84	84	105	61	53	39	13	21
RAU	0	0	24	75	75	75	75	75	75	41	0	0
ETPp	87	54	25	17	15	17	37	50	87	107	131	118
ETPr	39	54	25	17	15	17	37	50	87	80	13	21
Déficit	48								34	27	118	97
Exceso				108	69	67	68	11				
Lluvia útil acumulada				108	177	244	312	323				

P: precipitación media mensual; RAU: reserva de agua utilizable; ETPp-r: evapotranspiración potencial-real

Así se obtiene una lluvia susceptible de infiltrarse de 323 mm, a los que hay descontar las pérdidas por escorrentía superficial, estimadas entre un 75 y un 95 % (según cálculos mediante los métodos de Turc o de Coutagne) de la lluvia total, por lo que la lluvia útil sería el 10 % de la anterior, es decir 30 mm anuales, sin embargo no se llega a una estimación global de la infiltración y de la recarga en el área de alimentación, dado que no existe una estimación de la superficie de ésta.

Esta superficie de alimentación, puede ser calculada de un modo estimativo en base al caudal anual de explotación y de la infiltración.

Sin embargo los datos de caudal de explotación ofrecidos por diversas fuentes (BOE de 3 de julio de 2002 en el que se autoriza la explotación de las aguas minero-medicinales del manantial de LAIAS, informe de propuesta de perímetro de GEOCISA de 1999 y página web de balneario) son muy dispares.

En función de los datos de que se dispone, con caudales para la captación variables entre 3 y 8 L/s, se puede tener:

- Con 3 L/s (BOE):

$$\text{Sup} = (94.608.000 \text{ L/año}) / (30 \text{ L/m}^2 \cdot \text{año}) = 3.153.600 \text{ m}^2$$

- Con 4,1 L/s (GEOCISA):

$$\text{Sup} = (129.297.600 \text{ L/año}) / (30 \text{ L/m}^2 \cdot \text{año}) = 4.309.920 \text{ m}^2$$

- Con 8 L/s (Página web):

$$\text{Sup} = (252.288.000 \text{ L/año}) / (30 \text{ L/m}^2 \cdot \text{año}) = 8.409.600 \text{ m}^2$$

que son superficies muy dispares en función del caudal de explotación que se considere.

El origen de las aguas hidrominerales de Laias no es claro, si bien se han sugerido dos posibles orígenes (GEOCISA, 1999). Estos son:

- Mediante los análisis de isótopos de deuterio (D) y oxígeno 18 (¹⁸O), que en conjunto se adaptan a la línea meteórica mundial en concreto a aguas de procedencia atlántica se llega a una estimación de las zonas de infiltración y recarga. Estos análisis de D y ¹⁸O indican zonas de infiltración correspondientes a unas altitudes entre 575 m s.n.m. y 494 m s.n.m.

A partir del análisis de la topografía regional se estima que las zonas de recarga pueden corresponder al monte de San Trocadero cuyo vértice se sitúa

a 550 m s.n.m, al N de las captaciones, y los montes do Rosario y das Cortiñas al S.

- Sin embargo, mediante comparación de los valores obtenidos para D y ^{18}O en las aguas de Laias y las aguas del río Miño se observa que las diferencias entre ambos no son grandes, por lo que se plantea la posibilidad de que al menos la recarga parcialmente esté constituida por aguas del río. El análisis de las trazas de las fracturas parece indicar que el río Miño, al menos en alguno de sus tramos (aguas arriba del balneario), se haya encajado a favor de diferentes fracturas de dirección aproximada N 20 E y aquellas correspondientes al sistema de dirección N 100 E, lo que podría fundamentar la suposición anterior.

Aparte de las estimaciones anteriores hay que hacer una adaptación de la topografía en la evaluación de la alimentación en la zona de recarga mediante la utilización de mapas de pendientes topográficas, (como primera aproximación para ello se pueden emplear los existentes en el servidor web del Ministerio de Agricultura, figura 3-9, o la aplicación de modelos digitales del terreno a través de un SIG).

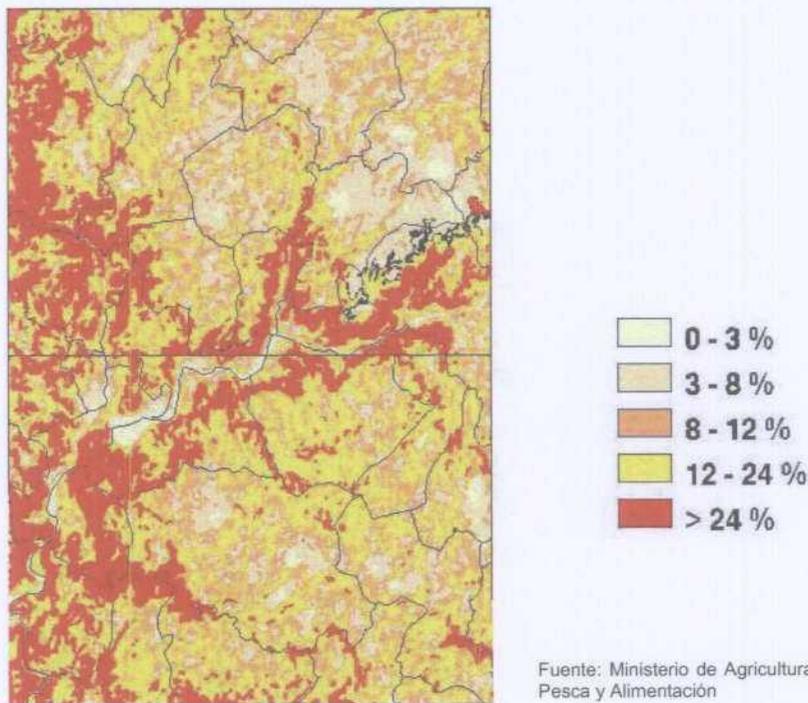


Figura 3-9: Mapa de pendientes de las hojas 187 y 225.

Como se ha indicado se han realizado análisis isotópicos de las aguas, entre otras de las correspondientes a la captación con concesión de aprovechamiento. Así se han realizado dataciones mediante el análisis del Tritio (^3H) y de Carbono 14 (^{14}C), que ofrecen los siguientes resultados:

- Los análisis de tritio en las aguas del pozo Laias N° 38 dieron como resultado una presencia del mismo en cantidades muy bajas con valores de $0,17 \pm 0,16$ y $0,30 \pm 0,21$, lo que indica que se trata de aguas antiguas, de infiltración al

menos anterior a 1952 (valores menores de 5 U.T.), sin poder alcanzarse una precisión mayor.

- Los análisis complementarios de ^{14}C , que permite datar el agua en función del porcentaje de actividad de este isótopo en la muestra con respecto a una muestra patrón moderna indican edades aproximadas de unos 14.000 años, que aplicando la corrección de Tamers (que tiene en cuenta las concentraciones de HCO_3^- y CO_2) obtienen una edad de 8.000 años por lo que el tiempo de tránsito del agua desde su infiltración es muy elevado, posiblemente por la profundidad de circulación de las aguas a través de las fracturas.

Esta profundidad es calculada con el geotermómetro de intercambio iónico Na-K-Ca, de Fournier y Truesdell (Fournier y Truesdell, 1973), que indica una temperatura máxima de 108 °C y estima una profundidad de 2 km.

Siendo el objetivo del presente estudio hacer un análisis de las posibilidades de protección de las captaciones de los recursos hidrotermales, es necesario destacar que la zona en la que se encuentran los manantiales y pozos termales, entre ellos el manantial Laias nº 38, corresponde a terrenos formados por materiales graníticos adamellíticos en muchos casos bastante alterados en sus partes más superficiales de los mismos, alteración cuya potencia no es conocida. También existen materiales cuaternarios correspondientes a terrazas del río Miño, coluviales y eluviales.

Aparte de los anteriores existen materiales cuyo origen es el relleno efectuado para nivelar y elevar, al construir la presa de Castrelo do Miño, una plataforma de ribera convertida en parque fluvial en la zona de las surgencias. Estos se componen de escombros, estériles de cantería y tierras de diversa procedencia. Sin embargo no se conoce, por carencia de información de la presencia de suelos de tipo edáfico.

Se hace pues imprescindible hacer una evaluación en detalle de la existencia de cada uno de estos tipos de materiales para establecer su papel como cobertera de protección o como potenciales transmisores de contaminantes potenciales a las captaciones por la existencia de heterogeneidades y vías preferentes de migración (sirva como ejemplo las variaciones de los niveles de estas captaciones en función de las variaciones del nivel embalse de Castrelo do Miño), a través del análisis de su existencia o no, analizando la potencia mediante calicatas, columnas de sondeos, cortes en vías de comunicación y desmontes y obras de vaciado llevadas a cabo en la zona entre otros.

De manera similar es necesario establecer, en la medida de lo posible, las características hidráulicas de estas formaciones, si bien es complejo al menos realizando una primera aproximación mediante la realización de ensayos de infiltración.

3.1.5. Focos potenciales de contaminación

En el entorno de la captación hidromineral denominada Laias nº 38, origen del aprovechamiento del Balneario de Laias se ha descrito un inventario de focos de contaminación (GEOCISA, 1999), si bien este es en exceso simplista, sin análisis detallados de cada punto aunque considera los focos potenciales de contaminación de diversos orígenes (red de saneamiento y depuración de aguas residuales, actividades agropecuarias, actividades industriales y otros).

Probablemente este no abarca ni el término municipal de Cenlle completo ni aquellos próximos que engloban el área o áreas que pueden ser consideradas como de alimentación del manantial antes indicadas. En este inventario se destacan:

Focos contaminantes de tipo agrícola

Mayoritariamente viñedos y pequeños huertos, en los que el uso de fertilizantes es de tipo predominantemente mineral.

Este inventario de focos agrícolas se puede completar mediante el empleo de los mapas de cultivos y aprovechamientos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (figura 3-11), aunque no existe mapa actualizado publicado de esta zona.

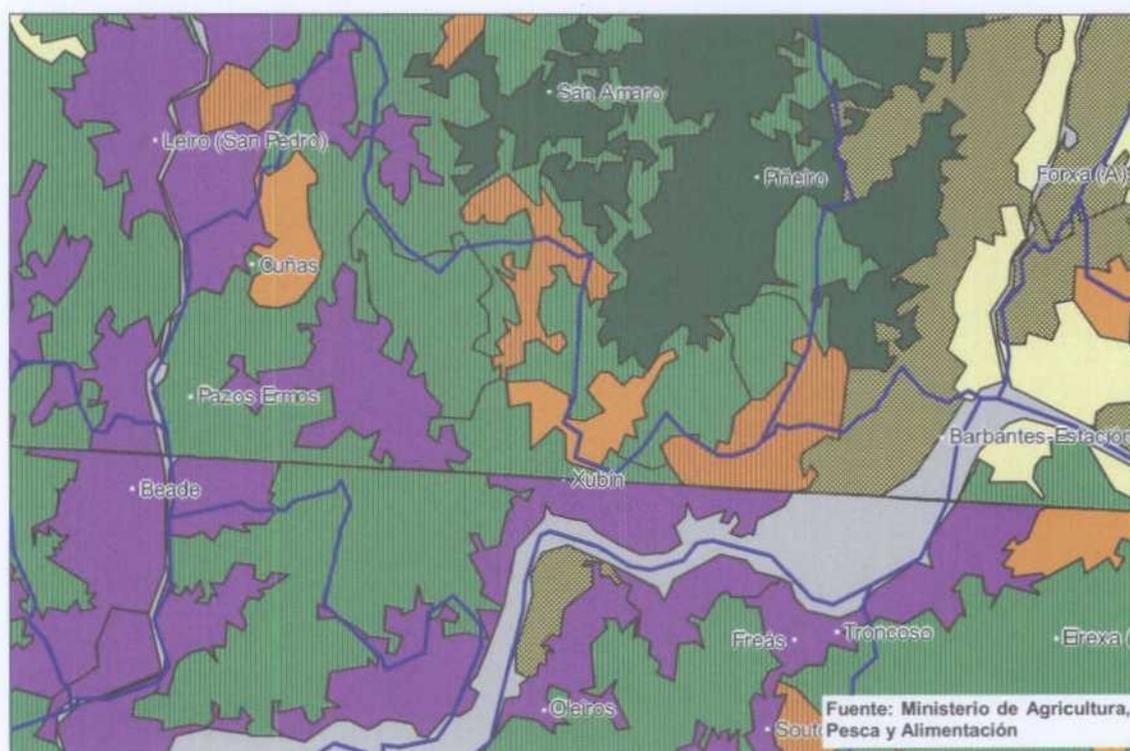


Figura 3-11: Cartografía de cultivos del área de estudio

En general de este mapa se obtiene la información recogida en la tabla 3-3 acerca de los cultivos mayoritarios, que coincide con los datos de informes previo y acerca de las cubiertas vegetales existentes en el conjunto del término municipal.

Tabla 3-3: Datos de cultivos mayoritarios y cubiertas vegetales del municipio de Cenlle.

USO	SUPERFICIE (ha)
Asociación de coníferas y otras frondosas	110,5
Coníferas	1342,1
Improductivo	245,8
Labor en secano	1,4
Matorral	217,3
Matorral con coníferas	181,0
Pastizal	3,7
Prados naturales	6,6
Viñedo en secano	807,0
SUPERFICIE TOTAL	2915,4 ha

Estos datos pueden ser consultados para los diferentes municipios situados en el área de alimentación y del actual perímetro de protección, con el fin de establecer un marco de evaluación más amplio que incluya el conjunto de las zonas potenciales de alimentación de los manantiales.

Focos contaminantes de tipo ganadero

El único ganado que se encuentra en la zona de Laias es vacuno, con presencia mínima (1 vaca en 1999).

Además existen en la zona varias granjas abandonadas, que en su día se dedicaban a la cría de pollos y cerdos. Estas fueron abandonadas por la creación de la cooperativa COREN, cuyas instalaciones se localizan fuera del término municipal de Cenlle.

La ganadería de vacuno es más importante en la margen izquierda del río Miño (zona en la que se encuentran el Monte do Rosario y el Monte das Cortiñas).

En los términos municipales próximos a Cenlle la situación de la ganadería es similar a la descrita.

Focos contaminantes de tipo industrial

Existen varias actividades industriales que comprenden: taller de puertas y cerraduras, taller mecánico, almacén de materiales de construcción, nave de maquinaria de construcción, naves abandonadas.

Focos contaminantes de tipo urbano

Se consideran únicamente un lavadero (próximo a la captación Laias nº 38), un vertedero incontrolado de residuos inertes (en Barbantes Estación), y el cementerio.

3.1.6. Ordenación del territorio

No existe planeamiento urbanístico en vigor en el término municipal de Cenlle según se recoge en la Consellería de Política Territorial, Obras Públicas e Vivenda de la Xunta de Galicia a través de su página web, (figura 3-10).

3.1.7. Perímetro de protección vigente

La Resolución por la que se autoriza el aprovechamiento de aguas minero-medicinales del manantial de Laias, término municipal de Cenlle (Ourense), fue publicada en el BOE el 3 de julio de 2002, con un perímetro de protección definido por tres zonas que quedan definidas por los vértices de coordenadas geográficas:

- Zona de Restricciones Máximas (ZMA):

Círculo de 12 metros de radio con centro en la captación (sita ésta en el punto de longitud 8° 01' 48.18" y la latitud 42° 19' 41.36" N).

- Zona de Restricciones Medias (ZME):

V.1 8° 03' 18.83" 42° 19' 24.25".

V.2 8° 02' 46.25" 42° 20' 24.61".

V.3 8° 01' 16.91" 42° 20' 22.66".

V.4 8° 00' 09.21" 42° 20' 06.42".

V.5 8° 00' 13.74" 42° 19' 34.03".

V.6 8° 01' 06.28" 42° 19' 12.77".

V.7 8° 02' 16.79" 42° 19' 09.96".

- Zona de Restricciones Mínimas (ZMI):

V.1 8° 04' 13.08" 42° 19' 48.62".

V.2 8° 01' 46.73" 42° 20' 58.15".

V.3 7° 59' 48.78" 42° 21' 08.58".

V.4 7° 59' 55.51" 42° 19' 35.07".

V.5 8° 02' 21.92" 42° 18' 20.40".

En este perímetro de protección se establecen las restricciones especificadas en el apartado 1-2 referente a la legislación autonómica en el que se recogen las consideraciones referentes al Decreto 116/2001 y en la tabla 1-1 que recoge las restricciones específicas en las zonas de restricciones mínimas y

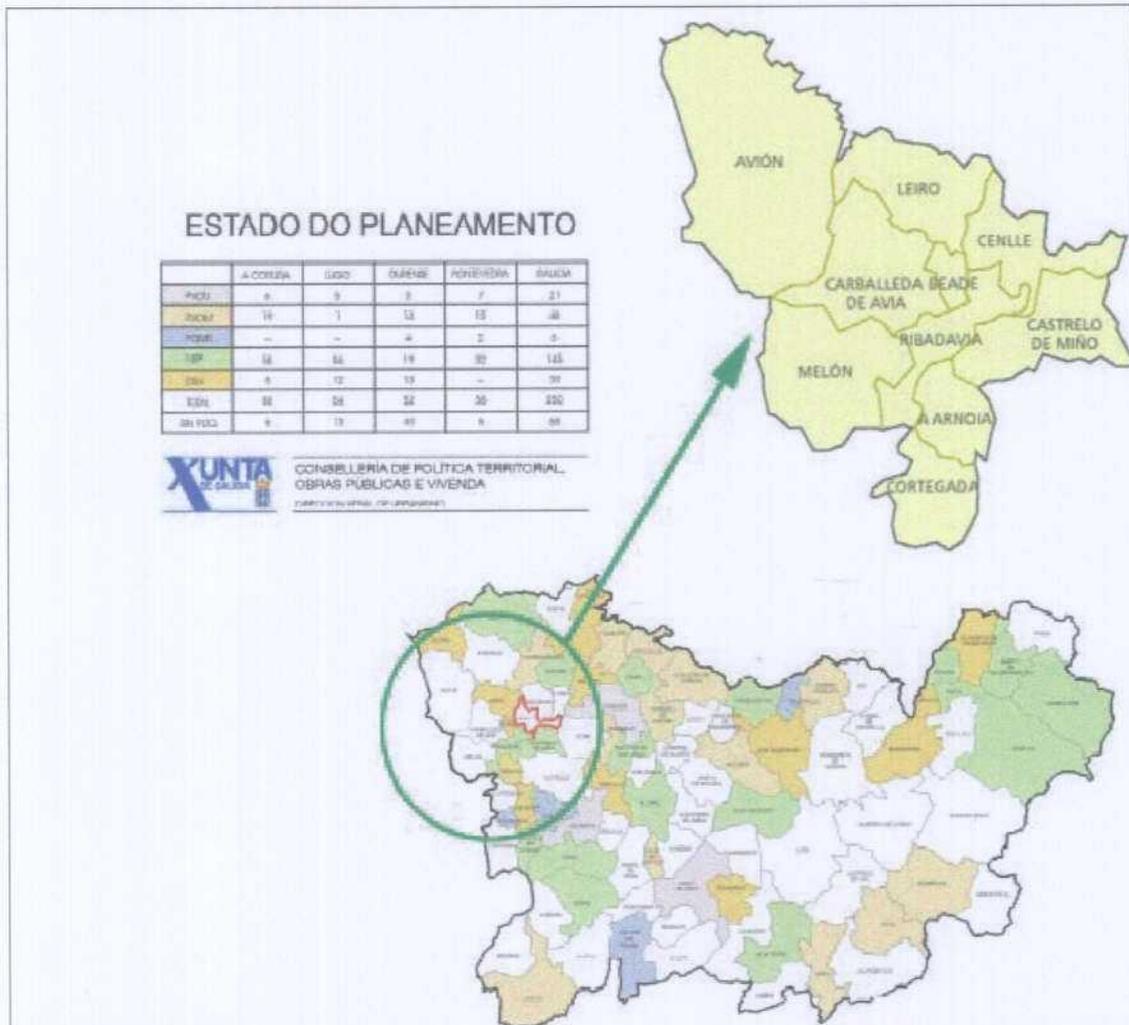


Figura 3-10: Ordenación del territorio en el área de estudio.
medias de los perímetros de protección

3.2. Información disponible para la aplicación de los diferentes métodos

En las tablas 3-4 a 3-12 se reseña si existe la información indicada complementándose su calidad o consideraciones adicionales en la columna de observaciones.

3.2.1. Aplicación de métodos hidrogeológicos y trazadores

Tabla 3-4: Datos disponibles para la aplicación de métodos hidrogeológicos para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Existencia	Observaciones
Cartografía hidrogeológica	¿Sí?	Escala 1:200.000 (IGME), el detalle de la cartografía es claramente insuficiente
Análisis estructural	¿Sí?	Análisis de fracturas excesivamente somero. Mapas geológicos 1:50.000 y 1:200.000 (IGME)
Análisis hidroquímico	¿Sí?	Análisis no periódicos que impiden la evaluación del comportamiento en el tiempo del sistema (GEOCISA, 1999) No existe análisis de continuidad espacial y evolución de las aguas a través del acuífero
Análisis de las isopiezas y de las direcciones de flujo	¿Sí?	Solo se determina un flujo profundo, de hasta 2 km, supuesto a partir de la aplicación de geotermómetros (GEOCISA)
Relación entre el acuífero y los cursos de agua superficiales	¿Sí?	Sólo se establece una hipótesis de posible recarga (parcial) del acuífero a partir de las aguas procedentes de la cabecera del río Miño)
Testificación hidráulica en secciones aisladas (con la utilización de packers)	NO	
Testificación geofísica	NO	
Aforos de ríos y manantiales	¿Sí?	Los datos de caudal del manantial principal son muy diferentes según la fuente consultada (BOE, GEOCISA, página web). Datos de caudales en inventario de puntos (GEOCISA)
Ensayos de trazadores	NO	No existen ensayos de trazadores artificiales para conocer dirección, sentido y velocidad de flujo

Datación por diversos métodos	Sí	Tritio (^3H) y Carbono 14 (^{14}C) (GEOCISA), se estiman edades de al menos 8.000 años
Otras técnicas	¿Sí?	Utilización de los isótopos Oxígeno 18 (^{18}O) y Deuterio (D) como estimadores de zonas potenciales de recarga por altura de infiltración (GEOCISA). Ensayos de bombeo escalonados y de caudal continuo, para la obtención de parámetros hidráulicos (GEOCISA).

3.2.2. Métodos en medios asimilables a porosidad intergranular

Tabla 3-5: Datos disponibles para la aplicación de métodos en medios asimilables a porosidad intergranular para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Existencia	Observaciones
Caudal (Q)	SÍ	Muy variable para el manantial de Laias según las diferentes fuentes consultadas, entre 3 y 8 L/s (BOE, GEOCISA, página web)
Potencial hidráulico (i)	NO	No existen isopiezas
Conductividad hidráulica (K)	NO	
Espesor saturado (b)	NO	
Porosidad eficaz (m_e)	NO	
Coefficiente de almacenamiento (S)	SÍ	Calculado mediante ensayo de bombeo de nivel constante (GEOCISA) con valor de $S = 5 \cdot 10^{-3}$
Recarga (N)	¿Sí?	Valores medios de infiltración y estimaciones "vagas" acerca de las zonas de recarga
Transmisividad (T)	SÍ	Calculada mediante ensayo de bombeo de nivel constante (GEOCISA) con valores entre 375 y 650 $m^2/día$, media 440 $m^2/día$ y valor propuesto 400 $m^2/día$
Velocidad eficaz (V_e)	NO	
Límites del acuífero captado	NO	
Cartografía hidrogeológica del acuífero (isopiezas, divisorias,...)	¿Sí?	Solo se tiene la cartografía 1:200.000 del IGME
Litología y tramo recorrido en la zona saturada y no saturada	¿Sí?	Se conoce la litología, granitos, pero se desconocen las zonas saturadas y no saturadas y los tramos recorridos así como los espesores de zonas de materiales cuaternarios, de alteración y de relleno
Datos necesarios para la elaboración de modelos matemáticos	NO	Imposible según el estado de conocimiento actual

3.2.3. Aplicación del método PI

Tabla 3-6: Datos disponibles para la aplicación del método PI para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios		Existencia	Observaciones
Suelo (T), capacidad de campo		NO	
Recarga (R)		SÍ	Sólo es necesario el dato de recarga en mm/año sin necesidad del área de infiltración (GEOCISA)
Subsuelo (S), distribución del tamaño de grano		NO	No se encuentran descritos los rellenos ni materiales detríticos presentes en superficie
Litología (L)		SÍ	Granitos (rocas plutónicas)
Fracturación (F)		SÍ	Es suficiente con el análisis que se tiene para clasificarlo como moderadamente o muy fracturado (GEOCISA)
Espesor de los estratos (M)		NO	Similar al caso del factor S
Presión Artesiana (A)		SÍ	Se conoce que en algunos casos los manantiales son surgentes por encima del relleno antrópico (GEOCISA)
Propiedades del suelo	Profundidad del estrato permeable	NO	
	Conductividad hidráulica saturada	NO	
Tipo de terreno/Pendiente		¿SÍ?	Existen mapas de pendientes (Ministerio de Agricultura P. y A.), pero es conveniente un análisis en profundidad utilizando si es posible un modelo digital del terreno o un SIG
Mapa de la cuenca vertiente (geomorfología)		¿SÍ?	Al menos se necesita un análisis del entorno y las posibles áreas de recarga mediante fotografías aéreas, de mayor detalle que el existente (GEOCISA)

3.2.4. Aplicación de del método DRASTIC

Tabla 3-7: Datos disponibles para la aplicación del método DRASTIC para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Existencia	Observaciones
Profundidad del nivel (D)	¿Sí?	Existen niveles únicamente en el entorno de la captación (GEOCISA). Son necesarios más datos en todo el área
Recarga neta (R)	¿Sí?	Se puede estimar según datos de infiltración (GEOCISA) para la zona que se estime
Naturaleza del acuífero (A)	SÍ	Rocas ígneas y metamórficas (alteradas)
Tipo de suelo (S)	NO	Suelos no descritos
Topografía de las pendientes (T)	¿Sí?	Existen mapas de pendientes (Ministerio de Agricultura P. y A.), pero es conveniente un análisis en profundidad utilizando si es posible un modelo digital del terreno o un SIG
Impacto de la zona no saturada (I)	¿Sí?	Tamaño de grano, fracturación y granulometría de la z.n.s., escasamente documentado
Conductividad hidráulica (C)	NO	Valores no descritos

3.2.5. Aplicación del método SINTACS

Tabla 3-8: Datos disponibles para la aplicación del método DRASTIC para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Existencia	Observaciones
Profundidad del agua (S)	¿Sí?	Existen niveles únicamente en el entorno de la captación (GEOCISA). Son necesarios más datos en todo el área
Infiltración efectiva (I)	¿Sí?	Se conoce, pero no el área de alimentación, por lo que puede ser una generalización excesiva
Efecto atenuante de la zona no saturada (N)	NO	No se conocen los espesores de ésta, ni sus propiedades hidráulicas
Tipo de suelo (T)	NO	Suelos no descritos en la zona
Características hidrogeológicas del acuífero (A)	¿Sí?	Posiblemente el conocimiento sea mejorable mediante trabajo de campo centrado en los aspectos fundamentales requeridos
Conductividad hidráulica (C)	NO	
Pendiente topográfica media (S)	¿Sí?	Existen mapas de pendientes (Ministerio de Agricultura P. y A.), pero es conveniente un análisis en profundidad utilizando si es posible un modelo digital del terreno o un SIG

3.2.6. Aplicación del método GOD

Tabla 3-9: Datos disponibles para la aplicación del método GOD para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Existencia	Observaciones
Tipo de acuífero (G)	SÍ	Semiconfinado? (GEOCISA)
Naturaleza del acuífero (O)	SÍ	Rocas ígneas (GEOCISA, IGME)
Profundidad del nivel freático o techo del acuífero confinado (D)	¿SÍ?	Existen niveles únicamente en el entorno de la captación (GEOCISA). Son necesarios más datos en todo el área

3.2.7. Aplicación del método DISCO

Tabla 3-10: Datos disponibles para la aplicación del método DISCO para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Existencia	Observaciones
Discontinuidades		
Análisis geomorfológico	¿Sí?	Es conveniente una revisión de los datos existentes (GEOCISA)
Análisis fotografías aéreas	¿Sí?	Al menos se necesita un análisis del entorno y las posibles áreas de recarga mediante fotografías aéreas, de mayor detalle que el existente (GEOCISA)
Propiedades	NO	No descritas (longitud, abertura, colmatación, intercomunicación...)
Ensayos de trazadores	NO	No existen ensayos de trazadores artificiales para conocer dirección, sentido y velocidad de flujo
Cobertera de protección		Existen materiales de relleno y cuaternarios (suelos) (GEOCISA)
Suelos		
- Permeabilidad	NO	No descritos
- Espesor	NO	
Formaciones de baja permeabilidad		
- Espesor	NO	No descritos
Escorrentía		Se estima la escorrentía superficial entre el 79 y el 95 % de la lluvia total (GEOCISA)
Pendiente topográfica	¿Sí?	Existen mapas de pendientes (Ministerio de Agricultura P. y A.), pero es conveniente un análisis en profundidad utilizando si es posible un modelo digital del terreno o un SIG

3.2.8. Aplicación del método de los contornos de probabilidad

Tabla 3-11: Datos disponibles para la aplicación del método de los contornos de probabilidad para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Existencia	Observaciones
Aplicación de un modelo de fracturas:		
Densidad de fracturas o espaciado	¿Sí?	No es posible establecerlo con la precisión requerida mediante el esquema existente (GEOCISA)
Orientación	SÍ	Tres familias o conjuntos de fracturas diferenciados, N10-30E, N160E y N100E (GEOCISA)
Longitud de fracturas	¿Sí?	No es posible establecerlo mediante el esquema existente (GEOCISA)
Apertura	NO	No descrita
Correlaciones estadísticas a partir de las fracturas aflorantes	NO	No determinables a partir de los datos existentes
Modelización	NO	No se puede llevar a cabo sin la obtención previa de los datos necesarios
Aplicación de un modelo de flujo y transporte para porosidad intergranular	NO	Necesita de la obtención previa de los datos anteriores y calibración del modelo de fracturas

3.2.9. Aplicación del método de Bölsenkötter

Tabla 3-12: Datos disponibles para la aplicación del método de Bölsenkötter para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Existencia	Observaciones
Descripción del material	¿Sí?	Granitos como acuífero, sin determinar los recubrimientos existentes
Espesor vertical de los materiales en la zona no saturada	NO	No descrito
Índice de depuración para esos materiales en la zona no saturada	SÍ	Aplicación de las tablas del método (IGME)
Índice de depuración para esos materiales en la zona saturada	SÍ	Aplicación de las tablas del método (IGME)
Longitud atravesada de la zona saturada	NO	No descrito

3.3. Información que es necesario obtener para la aplicación de los diferentes métodos

En las tablas 3-13 a 3-21 se indica si se carece de la información requerida o si es necesario mejorar ésta, detallándose su calidad o consideraciones adicionales en la columna de observaciones.

3.3.1. Aplicación de métodos hidrogeológicos y trazadores

Tabla 3-13: Datos no disponibles para la aplicación de métodos hidrogeológicos para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Ausencia o necesidad de mejora	Observaciones
Cartografía hidrogeológica	Sí (mejorar)	Solo existe a escala 1:200.000 (IGME)
Análisis estructural	Sí (mejorar)	Necesidad de análisis de detalle de las fracturas (tamaño, apertura, colmatación,...). No se han considerado otras estructuras.
Análisis hidroquímico	Sí (mejorar)	Hace falta llevar a cabo un análisis de continuidad espacial y evolución de las aguas a través del acuífero
Análisis de las isopiezas y de las direcciones de flujo	Sí (mejorar)	Datos de niveles no correlacionables temporalmente (GEOCISA, 1999) basados en diferentes bases de datos y actualizaciones.
Relación entre el acuífero y los cursos de agua superficiales	Sí (mejorar)	Sólo se establece una hipótesis de posible recarga (parcial) del acuífero a partir de las aguas procedentes de la cabecera del río Miño)
Testificación hidráulica en secciones aisladas (con la utilización de packers)	Sí	Para la localización en el entorno próximo de fracturas de importancia. Al tratarse de un manantial sería necesario efectuarla en sondeos próximos
Testificación geofísica	Sí	Posiblemente indique espesor de rellenos y formaciones detríticas, así como las discontinuidades de mayor entidad

Aforos de ríos y manantiales	SÍ (mejorar)	Al menos sería necesario solicitar información a la Confederación Hidrográfica del Norte (y a Unión FENOSA, responsable del embalse)
Ensayos de trazadores	SÍ	No existen ensayos de trazadores, artificiales. Sólo se usan los naturales para datación y estimación del área de infiltración
Datación por diversos métodos	NO	³ H y ¹⁴ C, dan edades aproximadas de 8.000 años
Otras técnicas	SÍ	Hace falta efectuar ensayos escalonados

3.3.2. Aplicación de métodos en medios asimilables a porosidad intergranular

Tabla 3-14: Datos no disponibles para la aplicación de métodos en medios asimilables a porosidad intergranular para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Ausencia o necesidad de mejora	Observaciones
Caudal (Q)	NO	
Potencial hidráulico (i)	SÍ	No existen isopiezas ni en detalle ni a escala regional
Conductividad hidráulica (K)	SÍ	No descrito
Espesor saturado (b)	SÍ	No descrito
Porosidad eficaz (m_e)	SÍ	No descrito
Coefficiente de almacenamiento (S)	NO	
Recarga (N)	SÍ (mejorar)	Únicamente se estima la infiltración sin determinar el área de recarga ni el volumen de ésta
Transmisividad (T)	NO	
Velocidad eficaz (V_e)	SÍ	No descrito
Límites del acuífero captado	SÍ	No hay cartografía de detalle
Cartografía hidrogeológica del acuífero (isopiezas, divisorias,...)	SÍ (mejorar)	No hay cartografía de detalle. Únicamente hay cartografía de escala 1:200.000 (IGME)
Litología y tramo recorrido en la zona saturada y no saturada	SÍ (mejorar)	Se conoce la litología, granitos, pero se desconocen las zonas saturadas y no saturadas y los tramos recorridos así como los espesores de zonas de materiales cuaternarios, de alteración y de relleno
Datos necesarios para la elaboración de modelos matemáticos	SÍ	Faltan muchos datos para poder elaborar un modelo mínimamente consistente

3.3.3. Aplicación del método PI

Tabla 3-15: Datos no disponibles para la aplicación del método PI para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios		Ausencia o necesidad de mejora	Observaciones
Suelo (T), capacidad de campo		SÍ	No existen estimaciones de la capacidad de campo de la zona superficial
Recarga (R)		NO	
Subsuelo (S), distribución del tamaño de grano		SÍ	Es necesario analizar en que casos existen rellenos o materiales detríticos por encima del medio fisurado y los tamaños de grano y distribución de éstos
Litología (L)		NO	
Fracturación (F)		NO	
Espesor de los estratos (M)		SÍ	Similar al caso del factor S
Presión Artesiana (A)		NO	Se conoce que en algunos casos los manantiales son surgentes por encima del relleno antrópico (GEOCISA)
Propiedades del suelo	Prof. estrato permeable	SÍ	
	Cond. hidráulica saturada	SÍ	
Tipo de terreno/Pendiente		SÍ (mejorar)	Existen mapas de pendientes (Ministerio de Agricultura P. y A.), pero es conveniente un análisis en profundidad utilizando si es posible un modelo digital del terreno o un SIG
Mapa de la cuenca vertiente (geomorfología)		SÍ (mejorar)	No se tiene análisis ni mapas geomorfológicos

3.3.4. Aplicación de del método DRASTIC

Tabla 3-16: Datos no disponibles para la aplicación del método DRASTIC para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Ausencia o necesidad de mejora	Observaciones
Profundidad del nivel (D)	SÍ (mejorar)	Son necesarios más datos en todo el área
Recarga neta (R)	NO	Se puede estimar. Sería conveniente la determinación de las zonas de alimentación
Naturaleza del acuífero (A)	NO	Rocas ígneas y metamórficas (alteradas). Conviene mejorar el conocimiento
Tipo de suelo (S)	SÍ	No descrito
Topografía de las pendientes (T)	SÍ (mejorar)	Existen mapas de pendientes (Ministerio de Agricultura P. y A.), pero es conveniente un análisis en profundidad utilizando si es posible un modelo digital del terreno o un SIG
Impacto de la zona no saturada (I)	SÍ (mejorar)	Tamaño de grano, fracturación y granulometría de la z.n.s., escasamente documentado
Conductividad hidráulica (C)	SÍ	Valores no descritos

3.3.5. Aplicación del método SINTACS

Tabla 3-17: Datos no disponibles para la aplicación del método DRASTIC para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Ausencia o necesidad de mejora	Observaciones
Profundidad del agua (S)	SÍ (mejorar)	Son necesarios más datos en todo el área
Infiltración efectiva (I)	SÍ (mejorar)	Puede ser una generalización excesiva la estimada actualmente
Efecto atenuante de la zona no saturada (N)	SÍ	No se conocen los espesores de ésta, ni sus propiedades hidráulicas
Tipo de suelo (T)	SÍ	No descrito
Características hidrogeológicas del acuífero (A)	SÍ (mejorar)	Mejorable mediante trabajo de campo
Conductividad hidráulica (C)	SÍ	Valores no descritos
Pendiente topográfica media (S)	SÍ (mejorar)	Existen mapas de pendientes (Ministerio de Agricultura P. y A.), pero es conveniente un análisis en profundidad utilizando si es posible un modelo digital del terreno o un SIG

3.3.6. Aplicación del método GOD

Tabla 3-18: Datos no disponibles para la aplicación del método GOD para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Ausencia o necesidad de mejora	Observaciones
Tipo de acuífero (G)	NO	Semiconfinado?
Naturaleza del acuífero (O)	NO	Rocas ígneas
Profundidad del nivel freático o techo del acuífero confinado (D)	Sí (mejorar)	Son necesarios más datos en todo el área en el que se pretenda aplicar el método. Partiendo del inventario existente (GEOCISA) es posible obtener los datos necesarios

3.3.7. Aplicación del método DISCO

Tabla 3-19: Datos no disponibles para la aplicación del método DISCO para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Ausencia o necesidad de mejora	Observaciones
<p>Discontinuidades</p> <p>Análisis geomorfológico</p> <p>Análisis fotografías aéreas</p> <p>Propiedades</p> <p>Ensayos de trazadores</p>	<p>SÍ (mejorar)</p> <p>SÍ (mejorar)</p> <p>SÍ</p> <p>SÍ</p>	<p>Es conveniente una revisión de los datos existentes (GEOCISA)</p> <p>Al menos se necesita un análisis del entorno y las posibles áreas de recarga mediante fotografías aéreas, de mayor detalle que el existente (GEOCISA)</p> <p>No descritas</p> <p>Necesarios ensayos con trazadores artificiales</p>
<p>Cobertera de protección</p> <p>Suelos</p> <p>Permeabilidad</p> <p>Espesor</p> <p>Formaciones de baja permeabilidad</p> <p>Espesor</p>	<p>SÍ</p> <p>SÍ</p> <p>SÍ</p>	<p>Existen materiales de relleno y cuaternarios (suelos) (GEOCISA)</p> <p>No descrito. Necesarios ensayos de infiltración y perforaciones (barrenas manuales o sondeos mecánicos) y consulta de datos existentes.</p> <p>No descrito. Necesarios datos de perforaciones (preferiblemente sondeos mecánicos), datos existentes y si es posible nuevos complementarios.</p>
<p>Escorrentía</p> <p>Pendiente topográfica</p>	<p>SÍ (mejorar)</p>	<p>Se estima la escorrentía superficial entre el 79 y el 95 % de la lluvia total (GEOCISA)</p> <p>Existen mapas de pendientes (Ministerio de Agricultura P. y A.), pero es conveniente un análisis en profundidad utilizando si es posible un modelo digital del terreno o un SIG</p>

3.3.8. Aplicación del método de los contornos de probabilidad

Tabla 3-20: Datos no disponibles para la aplicación del método de los contornos de probabilidad para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Ausencia o necesidad de mejora	Observaciones
Aplicación de un modelo de fracturas		
Densidad de fracturas o espaciado	SÍ (mejorar)	No es posible establecerlo con la precisión requerida mediante el esquema existente (GEOCISA)
Orientación	NO	
Longitud de fracturas	NO	Es posible establecerlo mediante el esquema existente (GEOCISA)
Apertura	SÍ	Necesita trabajo de campo
Correlaciones estadísticas a partir de las fracturas aflorantes	SÍ	Necesita trabajo de campo, para el establecimiento de los parámetros en las fracturas aflorantes
Modelización	SÍ	No se puede llevar a cabo sin la obtención previa de los datos necesarios
Aplicación de un modelo de flujo y transporte para porosidad intergranular	SÍ	Necesita de la obtención previa de los datos anteriores y calibración del modelo de fracturas

3.3.9. Aplicación del método de Bölsenkötter

Tabla 3-21: Datos no disponibles para la aplicación del método de Bölsenkötter para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias.

Datos Necesarios	Ausencia o necesidad de mejora	Observaciones
Descripción del material	SÍ (mejorar)	Sin determinar los recubrimientos y materiales de la zona no saturada
Espesor vertical de los materiales en la zona no saturada	SÍ	Solo se tienen estimaciones acerca del área de alimentación, no se llega a una determinación concreta de la zona de infiltración
Índice de depuración para esos materiales en la zona no saturada	NO	
Índice de depuración para esos materiales en la zona saturada	NO	
Longitud atravesada de la zona saturada	SÍ	

tes para la protección de la cantidad

bles para la protección de la cantidad en el manantial de Laias.

Datos Necesarios		Existencia	Observaciones
Recursos U.H.		NO	No se considera la zona, compuesta por materiales graníticos y metamórficos, como en una Unidad Hidrogeológica
Forma general de explotación		NO	
Concesiones		NO	
Definición del acuífero	Cartografía hidrogeológica	SÍ	1:200.000 (IGME)
	Límites	NO	
	Tipo de Acuífero	SÍ	Fisurado confinado (GEOCISA)
	Balance hidrog. detallado	NO	Solamente estimación general de la infiltración (GEOCISA)
Mediciones Etapa A		NO	No se considera U.H.
Piezometría en diversas estaciones		NO	Datos piezométricos puntuales, sin evolución ni diferentes estaciones (GEOCISA)
Hidrodinámica e hidroquímica		¿SÍ?	Datos puntuales en un entorno reducido que no permite un análisis detallado
Confinamiento hidrogeológico		SÍ	Fisurado, es necesario analizar el grado de fisuración y conexión de las fracturas
Caudal aprovechamiento aprobado		SÍ	3 L/s, (BOE) aprobado el 2 de julio de 2002
Relación a otros acuíferos		NO	No descrito
Definición área de influencia y área de alimentación		NO	No descrito
Combinación con métodos analíticos	R. Fijo Calculado-Ec. Volumétrica	¿SÍ?	Ver apartados 3.2.2. y 3.3.2. Algunos de los parámetros necesarios para algún método están descritos y otros
	R. Fijo Calculado-Ec. Volumétrica	¿SÍ?	
	Área necesaria de recarga para volumen extraído	¿SÍ?	
	Método de Hoffman y Lillich	¿SÍ?	
	Método de Albinet	¿SÍ?	
	Método de Horsley	¿SÍ?	
	Otros	¿SÍ?	
Análisis ³ H e isótopos estables ¹⁸ O y ² H		SÍ	³ H para datación. Isótopos estables para estimación de altura y estimación de la recarga
Ensayos con colorantes y otros		NO	No existen
Límites y condiciones de contorno		NO	No están definidos
Confinamiento hidrogeológico: capas, relaciones con aguas superficiales		¿SÍ?	No definidos, únicamente se establece la posibilidad de alimentación desde el río
Parámetros hidrodinámicos (K, T, S, m _e) y otras características necesarias		¿SÍ?	Se tiene solo parte de los parámetros que probablemente se necesiten, obtenidos de un ensayo de bombeo (S = 5·10 ⁻³ y T= 375 y 650 m ² /día, media 440 m ² /día y valor p m ² /día
Piezometría, aforos, evolución de niveles y distribución de bombeos para calibración		¿SÍ?	Se tienen niveles de piezometría pero no sus evoluciones en el tiempo y en algunos existen aforos. Sin embargo no existe una evaluación de los bombeos que permita de un modelo
Selección del modelo, calibración, simulación flujo, validación de la componente advectiva		NO	En el momento actual no es posible desarrollar modelos en el área del manantial por falta de gran cantidad de información para ello

Datos Necesarios		necesidad de mejora	Observaciones
Cursos U.H.		SÍ	No se considera la zona, compuesta por materiales graníticos y metamórficos, como en una Unidad Hidrogeológica.
Forma general de explotación		SÍ	
Concesiones		SÍ	
Definición del acuífero	Cartografía hidrogeológica	NO	1:200.000 (IGME)
	Límites	SÍ	
	Tipo de Acuífero	NO	Fisurado confinado (GEOCISA)
	Balance hidrog. detallado	SÍ	Solamente estimación general de la infiltración (GEOCISA)
Percutaciones Etapa A		SÍ	No se considera U.H.
Piezometría en diversas estaciones		SÍ	Necesario un seguimiento periódico
Hidrodinámica e hidroquímica		SÍ (mejorar)	Necesario un seguimiento periódico
Confinamiento hidrogeológico		NO	Fisurado
Caudal aprovechamiento aprobado		NO	3 L/s, (BOE)
Relación a otros acuíferos		SÍ	No descrito. Necesario estudio hidrogeológico detallado, incluyendo, en la medida de lo posible, cartografía más detallada que la existente
Definición de área de influencia y área de alimentación		SÍ	No descrito. Necesario estudio hidrogeológico detallado, incluyendo, en la medida de lo posible, cartografía más detallada que la existente
Combinación con métodos analíticos	R. Fijo Calculado-Ec. Volumétrica	SÍ (mejorar)	Ver apartados 3.2.2. y 3.3.2. Algunos de los parámetros necesarios para algún método están descritos y otros no. Es necesario efectuar más ensayos de bombeo en el entorno para una correcta estimación de los parámetros en todo el área
	R. Fijo Calculado-Ec. Volumétrica	SÍ (mejorar)	
	Área necesaria de recarga para volumen extraído	SÍ (mejorar)	
	Método de Hoffman y Lillich	SÍ (mejorar)	
	Método de Albinet	SÍ (mejorar)	
	Método de Horsley	SÍ (mejorar)	
	Otros	SÍ (mejorar)	
Análisis ^3H e isótopos estables ^{18}O y ^2H		NO	^3H , ^{18}O y ^2H
Ensayos con colorantes y otros		SÍ	Hay que evaluar la posibilidad de llevarlos a cabo, teniendo en cuenta las diferencias y el contexto geológico en hidrogeológico de la zona
Límites y condiciones de contorno		SÍ	Los análisis existentes son muy someros, se necesita un trabajo de gabinete y de campo exhaustivo
Confinamiento hidrogeológico: capas, relaciones en aguas superficiales		SÍ (mejorar)	No definidos, únicamente se establece la posibilidad de alimentación desde el río
Parámetros hidrodinámicos (K, T, S, m_e) y otras características necesarias		SÍ (mejorar)	Es necesario efectuar más ensayos de bombeo en el entorno para una correcta estimación de los parámetros en todo el área
Piezometría, aforos, evolución de niveles y distribución de bombeos para calibración		SÍ (mejorar)	Es necesario un control periódico de la piezometría y al menos una aproximación de los bombeos para permitir la calibración de modelos
Selección del modelo, calibración, simulación flujo, validación de la componente advectiva		SÍ	En el momento actual no es posible desarrollar modelos en el área del manantial. Se requiere una gran cantidad de información para ello, que posiblemente se puede ir definiendo a través de estudios previos para la aplicación de otros métodos de protección de calidad y

4. Propuesta de actividades a efectuar en la segunda fase

4.1. Propuesta de modificaciones legales

Como se ha descrito en el apartado 1.2., en el que se desarrolló la legislación autonómica que regula los aprovechamientos de las aguas hidrominerales de la Comunidad Autónoma de Galicia, estas están regidas por la Ley 5/1995, de 7 de junio, en que se establece la necesidad de fijar un perímetro de protección para la conservación del acuífero (artículo 13) aportando un estudio que justifique su necesidad y la delimitación propuesta. Este perímetro estará definido, según se recoge en la Ley, por coordenadas geográficas y constituido por tres zonas (de restricciones máximas, medias y mínimas) delimitadas empleando un criterio de tiempo de tránsito (tiempo que transcurre entre la entrada de una sustancia en el acuífero y su extracción por la captación).

En estas zonas se limitan las actividades que pueden realizarse, quedando éstas definidas por el Decreto 402/1996, de 31 de octubre, que desarrollaba la Ley anterior. Posteriormente, mediante el Decreto 116/2001, de 10 de mayo, se modificaron estas restricciones contempladas en el perímetro de protección, en su anexo I, reforzando la protección en la zona de restricciones máximas y la reduciendo las mismas en las zonas de restricciones medias y mínimas.

La legislación promulgada sobre las aguas minerales y termales por la Comunidad Autónoma de Galicia en virtud de sus competencias exclusivas sobre la materia ha regulado así muy positivamente un sector de gran relevancia social y económica de dicha Comunidad.

Sin embargo las diferentes características de los recursos hidrominerales, aguas minerales (mineromedicinales, mineroindustriales y minerales naturales), aguas termales y aguas de manantial en los que deben establecerse perímetros de protección para su salvaguarda, la diferencia en la antigüedad de las aguas captadas, en las características hidrogeológicas del acuífero (medios con porosidad intergranular, kársticos y fisurados) así como en las actividades socioeconómicas que existen en sus áreas de recarga y descarga hacen necesario emplear frecuentemente criterios y métodos diferentes y adecuados a esta problemática, como fue analizado en el apartado 2 proponiéndose una metodología específica adecuada a estas peculiaridades.

Geológicamente la Comunidad Autónoma de Galicia se encuentra en una amplia mayoría de su territorio ubicada en materiales de tipo ígneo, especialmente de carácter intrusivo, y de tipo metamórfico.

Estos materiales generalmente muy deformados reflejan en muchos casos la superposición de deformaciones tectónicas correspondientes a diversas fases orogénicas que hacen que la estructura sea en ocasiones muy compleja.

Asimismo, y desde el punto de vista hidrogeológico, generalmente éstos son considerados regionalmente como materiales impermeables o de conductividad hidráulica muy baja, si bien existen numerosas surgencias de aguas minerales y termales ligadas frecuentemente a un flujo por fisuras con tiempos de tránsito en el medio muy elevados.

En el apartado 3 se propone aplicar los métodos seleccionados a diferentes zonas piloto para perfilar una metodología aplicable con garantías a la

protección de todos los recursos hidrominerales de la Comunidad Autónoma de Galicia.

El problema podría surgir, si como resultado de dichos estudios se demostrase conveniente desde consideraciones metodológicas emplear métodos de evaluación de la vulnerabilidad que al no emplear el tiempo de tránsito requeriría una eventual modificación de la legislación vigente que solo contempla el empleo del tiempo de tránsito.

Para el establecimiento del criterio combinado tiempo de tránsito-evaluación de la vulnerabilidad para la delimitación de los perímetros de protección en este tipo de medios sería pues necesario llevar a cabo una modificación legal que contemplase las singularidades de los medios en los que se presentan las captaciones de aguas hidrominerales en la Comunidad Autónoma de Galicia, su complejidad estructural y limitaciones existentes a la hora de aplicar criterios que los hagan asimilables a medios de porosidad intergranular.

Así se propondría llevar a cabo una modificación de la Ley 5/1995, de 7 de junio, de regulación de las aguas minerales, termales, de manantial y de los establecimientos balnearios de la Comunidad Autónoma de Galicia, en la que se recogía la adopción del criterio de tiempo de tránsito como obligatorio para el establecimiento de los perímetros de protección y del Decreto 116/2001, de 10 de mayo, por el que se modifica el Decreto 402/1996, de 31 de octubre, por el que se aprueba el reglamento de aprovechamiento de las aguas mineromedicinales, termales y de los establecimientos balnearios de la Comunidad Autónoma de Galicia en el que se recogen las actividades a regular en el interior de los perímetros.

Asimismo, junto al establecimiento del mencionado criterio combinado es conveniente incluir en la posible modificación legal la necesidad de llevar a cabo una evaluación, previa a la aplicación de los criterios y de los métodos de delimitación de los perímetros de protección, del grado de fisuración del medio y de su mayor o menor asimilabilidad a un medio de porosidad intergranular que defina la mayor o menor conveniencia de aplicación de los diferentes criterios y métodos existentes como se ha visto en el apartado 2.

Aparte de la adopción de un criterio combinado de tiempo de tránsito-evaluación de la vulnerabilidad, es necesario tener en cuenta que con la aplicación de este segundo criterio las zonas en las que se subdividirá el perímetro de protección propuesto, si bien seguirán siendo tres, es muy probable que no se trate de formas con continuidad espacial sino que en muchos casos cabe la posibilidad de que una misma zona se encuentre formada por áreas en las que la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación sea similar pero sin embargo no exista una continuidad geográfica entre ellas. Por ello, la complejidad en las formas que se pueden presentar parece aconsejar la necesidad de llevar a cabo la delimitación de los perímetros de protección de estas captaciones utilizando, en la medida de lo posible sistemas de información geográfica, aspecto que debería de ser considerado también en la posible modificación legal a efectuar.

4.2. Actividades a realizar en futuras actuaciones

Para evaluar la posibilidad de aplicación de los métodos para delimitar perímetros de protección que se han seleccionado como más adecuados a las características de los recursos hidrominerales de la Comunidad Autónoma de Galicia (cuyo análisis se efectuó en el apartado 2), de un modo generalizado y con la máxima precisión a dicha Comunidad se seleccionó en este trabajo, por sus características hidrogeológicas, actividad antrópica y problemática asociada, la captación de aprovechamiento de recursos hidrominerales del Balneario de Laias, en el municipio de Cenlle, Orense.

El análisis efectuado en el apartado 3 ha permitido identificar la información disponible y la que se requiere para aplicar a dicho aprovechamiento los métodos indicados, ya sea por su total inexistencia, o al requerirse ahondar en el conocimiento de los datos y factores considerados.

Obtener dicha información es imprescindible para poder aplicar en esta zona piloto todos los métodos requeridos y comparar los resultados obtenidos, estableciendo una propuesta final de la metodología a emplear, trabajo este a efectuar en una segunda fase del presente trabajo.

En dicha fase sería conveniente además la aplicación de dichos métodos, efectuando también la comparación de resultados, en otras zonas piloto, como podría ser el Balneario de Lugo en el núcleo urbano de dicha ciudad y otras a precisar. Ello permitiría optimizar al máximo la precisión y aplicabilidad de la metodología propuesta previamente a su aplicación generalizada a todo el territorio de la Comunidad.

A continuación se expone de manera esquemática una relación de los diferentes trabajos y datos necesarios para la delimitación de perímetros de protección en el manantial de Laias. La información que es necesario obtener es muy variada, pudiéndose agrupar en tres grandes tipos:

- Socioeconómica de la zona, mediante datos que permitan hacer un encuadre general de la situación del manantial.
- Geológico e hidrogeológico del acuífero (para evaluar si éste es asimilable a un medio con porosidad intergranular o es un medio fisurado y su grado de fisuración, así como caracterizar con precisión el modelo conceptual del acuífero y su funcionamiento en el entorno de las captaciones a proteger) con el fin de aplicar la metodología que requieran sus características.
- Específica para la aplicación de los diferentes métodos analizados con detalle en el apartado 2.

Los **datos socioeconómicos generales**, de tipo estadístico, de ordenación urbana e infraestructuras entre otros, que es necesario mejorar para la delimitación del perímetro de protección de Laias comprenden:

- Datos actualizados de población y su evolución, contemplando no sólo la parroquia de Laias sino el resto del municipio de Cenlle y de los municipios colindantes e incluidos en las zonas que posiblemente se vean afectadas por el perímetro.
- Infraestructuras existentes para las captaciones, redes de conducción y distribución, depósitos, redes de alcantarillado y otros.

- Revisión y actualización del inventario de focos potenciales de contaminación. Ampliado y extendido tanto al término municipal de Cenlle como a aquellos limítrofes que de cualquier modo pudiesen afectar la calidad del agua del manantial. Entre estos hay que distinguir:
 - Focos potenciales de contaminación agrícolas. Es conveniente la realización de encuestas y entrevistas (ayuntamientos, consellerías,...) para revisar y actualizar los mapas de cultivos y aprovechamientos disponibles.
 - Focos potenciales de contaminación ganaderos, a establecer mediante encuestas y entrevistas.
 - Focos potenciales de contaminación industriales, de manera similar al punto anterior.
 - Focos potenciales de contaminación urbanos, de manera similar al punto anterior.
- Obtención de mapas topográficos actualizados a escala 1:10.000 ó 1:5.000.. Además se puede considerar la utilización de modelos digitales del terreno, que servirán para la evaluación de las pendientes topográficas, necesarias en los métodos de evaluación de la vulnerabilidad PI, DRASTIC, SINTACS y DISCO (apartados 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5 y 3.3.7).

Los **datos de tipo geológico e hidrogeológico** del acuífero y aquellos que son específicos para los diferentes métodos son expuestos, a continuación, en conjunto, indicando la referencia a los subapartados en los que se señala su existencia o ausencia y la necesidad de llevarlos a cabo.

- Actualización del inventario detallado de puntos de agua, estableciendo su localización, características, conservación, protección existente y al menos una medida de niveles que permita la correlación de los mismos en el tiempo. En este punto es conveniente la selección de aquellos puntos que puedan servir en la realización de las actividades posteriores de delimitación de los perímetros de protección.
- Elaboración de una cartografía hidrogeológica de detalle en la zona en que se encuentra la captación y sus posibles áreas de alimentación, que es específicamente necesaria para la aplicación de los métodos hidrogeológicos y de utilización de trazadores (apartado 3.3.1) y como complemento en aquellos casos en los que el medio se pueda asimilar a un acuífero de porosidad intergranular (apartado 3.3.2). La escala de la cartografía existente, 1:200.000, hace inadecuada su utilización para estos fines. Además se trata de una información imprescindible para la protección de la cantidad (apartado 3.4.2).
- Elaboración de mapas de isopiezas de detalle, en diferentes épocas con el fin de establecer las evoluciones y respuestas del sistema. Este dato es imprescindible en la aplicación de los métodos hidrogeológicos y de utilización de trazadores (apartado 3.3.1), los métodos aplicables en medios de porosidad intergranular (apartado 3.3.2), los métodos de evaluación de la vulnerabilidad del acuífero DRASTIC, SINTACS, y GOD (apartados 3.3.4, 3.3.5 y 3.3.6) y en la aplicación del método de Bölsenkötter para establecer la zona no saturada (apartado 3.3.9), así como para la protección de la cantidad (apartado 3.4.2).

- Análisis de detalle de fotografías aéreas, anteriores y posteriores a la construcción de la presa de Castrelo do Miño, y mapas geomorfológicos del área. Este permitirá una primera aproximación a las características de la fracturación y los rasgos geomorfológicos más destacados de la zona de estudio, incluyendo las zonas de infiltración preferencial, aplicándose para la delimitación de la cuenca de alimentación.

Se trata de un análisis requerido de manera específica para el método DISCO (apartado 3.3.7) y de manera indirecta para el método de los contornos de probabilidad (apartado 3.3.8) los métodos hidrogeológicos y de aplicación de trazadores (apartado 3.3.1), el método PI (apartado 3.3.3), los métodos DRASTIC y SINTACS (apartados 3.3.4 y 3.3.5) para evaluar la presencia de fracturas y el papel protector de las formaciones superficiales. Junto a ellos es fundamental en la protección de la cantidad especialmente en la obtención de datos en la etapa B (apartado 3.4.2).

- Identificación a partir de columnas de sondeos, calicatas y afloramientos en campo, entre otros, de los suelos edáficos, formaciones cuaternarias aluviales suprayacentes y rellenos antrópicos existentes en el área de estudio sobre el medio acuífero, así como de las alteraciones de las rocas ígneas y metamórficas. Es importante, en la medida de lo posible, establecer sus propiedades hidráulicas (conductividad hidráulica, porosidad...), con el fin de evaluar su posible función protectora de las aguas subterráneas.
- Análisis del tipo de red de drenaje, en gabinete y trabajos de campo, principalmente para la estimación de las relaciones con el acuífero y corroboración del posible encajamiento de este a favor de fracturas, fundamentalmente necesario para los métodos de tipo hidrogeológico (apartado 3.3.1) y para la aplicación del método PI (apartado 3.3.3.) como complemento en la evaluación de la geomorfología de la cuenca. Su utilización puede ser complementaria en caso de aplicación de otros métodos.
- Obtención de datos de aforos diferenciales de los cursos fluviales superficiales (entrevistas con la Confederación Hidrográfica del Norte), con un objetivo similar al punto anterior.
- Análisis de la recarga del acuífero y realización de balances hidrogeológicos del mismo, especialmente importante para la protección de la cantidad (apartado 3.4.2) y requerido para el conocimiento del funcionamiento general del acuífero, particularmente a la hora de elegir los métodos específicos para los perímetros de protección en medios fisurados.
- Trabajo de campo, complementarios al resto de actividades a realizar, tanto de confirmación de los datos previos existentes (evaluación de los datos obtenidos de fotografías aéreas, mapas temáticos y otros) como para la obtención de nuevos datos fundamentales para la aplicación de diferentes métodos. En este apartado cabe señalar la realización de:
 - Ensayos de bombeo para la obtención de diversos parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica, porosidad eficaz, coeficiente de almacenamiento, transmisividad) en diferentes puntos del entorno de la captación y en la zona del área de alimentación. Imprescindibles en la aplicación de métodos en medios asimilables a porosidad intergranular y métodos DRASTIC y SINTACS de evaluación de la vulnerabilidad (apartados 3.3.2, 3.3.4 y 3.3.5),

y en menor medida en los métodos hidrogeológicos (apartados 3.3.1) y en diferentes etapas de la metodología para la protección de la cantidad (apartado 3.4.2).

- Ensayos de bombeo escalonados con observación en puntos de control para la evaluación del comportamiento del acuífero y consideración del mismo como asimilable a un medio con porosidad intergranular, fracturado o altamente fracturado.
- Análisis geomorfológico y de existencia y espesor de suelos o formaciones de baja permeabilidad suprayacentes al acuífero. Puede ser llevado a cabo visualmente o mediante perforaciones, de tipo manual o mecánico, para la evaluación del tipo de formación, tamaño de grano, espesor de la zona no saturada, conductividad hidráulica, confinamiento del acuífero y posibilidades de depuración de los contaminantes.

Éstos son aplicables para todos los métodos expuestos excepto en el método de los contornos de probabilidad que no considera la existencia de este tipo de formaciones (apartado 3.3.8).

- Ensayos de infiltración sencillos (por ejemplo de doble anillo), que permitan una mejor evaluación de la recarga y de las zonas de infiltración preferencial.

Específicamente son necesarios en el método DISCO de evaluación de la vulnerabilidad (apartado 3.3.7) e importantes para la protección de la cantidad (apartados 3.4.2) y sería recomendable emplearlos en todos aquellos otros que necesiten evaluar la infiltración y recarga.

- Medidas de diferentes parámetros en los manantiales, *in situ* y *ex situ*, especialmente de aquellos que deben ser controlados periódicamente para la determinación de la asimilabilidad o no del medio a uno con porosidad intergranular. Estas medidas, excepto en el caso del análisis de las fracturas, han de ser tomadas en consideración con el análisis pluviométrico de estaciones cercanas como referencia. Comprenden entre otros:
 - Medidas de caudal de diferentes captaciones, que deberían de ser efectuadas con intervalos regulares y correlacionables temporalmente y no únicas como en el caso del manantial de Laias, por ejemplo de tipo mensual, añadiendo medidas adicionales que se correspondiesen con los eventos de precipitaciones intensas, lo que permitiría evaluar las respuestas del sistema.
 - Medidas de temperatura. Con las que se debería de actuar de forma similar a la llevada a cabo con el caudal, al ser este uno de los parámetros fundamentales en la evaluación de las respuestas del sistema. De forma similar al parámetro anterior los datos en el caso del Balneario de Laias son puntuales.
 - Medidas de conductividad eléctrica. Caso similar a los anteriores y con existencia únicamente de datos puntuales no periódicos.
 - Medidas o estimaciones de turbidez. Indicadoras, en casos de valores altos de la misma, de flujos de velocidad elevada que corresponderían a un flujo a través de una red de fracturas o conductos bien desarrolladas e intercomunicadas entre sí. En el caso de Laias no existen estas medidas.

- Medidas de dureza total. Se trata de un caso similar que los tres primeros (caudal, temperatura y conductividad eléctrica), que en los análisis de que se dispone no se contemplan en su evolución temporal.
- Análisis bacteriológicos, analizando su evolución con periodicidad, aunque menor que en el resto de parámetros, y especialmente tras precipitaciones intensas. Igual que en el resto se tiene únicamente medidas únicas sin diferenciaciones en el tiempo.
- Análisis de las fracturas en afloramiento:
 - ⇒ Densidad o espaciado.
 - ⇒ Orientación.
 - ⇒ Longitud.
 - ⇒ Apertura.
 - ⇒ Intercomunicación.
 - ⇒ Colmatación.
 - ⇒ ...

Mediante todos estos datos se puede llegar a la evaluación del comportamiento del acuífero, y a partir de su análisis detallado se ha de establecer la posibilidad de aplicación de los diversos métodos analizados, por lo que su estudio es necesario en las etapas iniciales de trabajo para cualquier método de protección de la calidad así como para la protección de la cantidad.

- Testificación hidráulica en sondeos mediante obturadores para la delimitación de zonas de flujo preferencial que pueden indicar la existencia de fracturas conductoras del agua del acuífero. Es preferentemente utilizable en los casos en que se decida la aplicación de métodos hidrogeológicos (apartado 3.3.1) y como complemento a otros métodos y técnicas.
- Ensayos de trazadores, especialmente con colorantes, que indiquen las posibles comunicaciones entre diferentes zonas del acuífero. Pueden ser de gran importancia en la aplicación de métodos hidrogeológicos (apartado 3.3.1), métodos de vulnerabilidad como el DISCO (apartado 3.3.7), así como en la etapa D de la metodología para la protección de la cantidad del recurso explotado (apartado 3.4.2).

5. Referencias bibliográficas

- Albinet, M. y Margat, J. 1970. *Cartographie de la vulnérabilité a la pollution de nappes d'eau souterraine*. Orleans, Francia. Bull. BRGM, 2º Series 3 (4), 13-22.
- Albinet, M. 1972. *Contribution à la délimitation des périmètres de protection des captages d'eau souterraine. Essai de détermination de l'aire d'alimentation de captages en nappes libres*. Note technique nº 3, BRGM 72. SGN 370. AME.
- Aller, L.; Bennet, T.; Lehr, J.H.; Petty, R.I. y Hackett, G. 1987. *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. United States Environmental Protection Agency. Ada, Oklahoma, EPA 600/2/87/035. 643 pp.
- Andreo, B.; Vías, J.M.; Perles, M.J.; Carrasco, F.; Vadillo, I. y Jiménez, P. 2002. Ensayo metodológico para la protección de aguas subterráneas en acuíferos carbonatados. Aplicación al sistema de Torremolinos. En: *Presente y futuro del agua subterránea en España y la Directiva Marco europea. Textos de las ponencias y comunicaciones*. Zaragoza. Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español.
- BRGM, 1998. *Les périmètres de protection en milieu fissuré: exemples et principes d'application*. BRGM R40289. 55 pp.
- Civita, M. 1994. *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Studi sulla vulnerabilità degli acquiferi. Teoria & Practica*. Pitagora Editrice. Bolonia. 325 pp.
- Corral Lledó, M.M., 2004. *Protección integral de los recursos hidrominerales*. Curso Internacional sobre Aguas Minerales y Termales. Argelia.
- Dershowitz, W.; Lee, G.; Geier, J.; Hitchcock, S.; LaPointe, P. y Thomas, A. 1998. *Fracman interactive discrete fracture data analysis, geometric modelling and exploration simulation. Version 2.6*. Golder Associates.
- Environment Agency. 1998. *Policy and practice for the protection of groundwater*. The Stationery Office, 57 pp.
- Environment Agency. 2001 a. *Guidance on the assessment and interrogation of subsurface analytical contaminant fate and transport models*. National Groundwater Contaminated Land Center report. Environment Agency. NC/99/38/1, 50 pp.
- Environment Agency. 2001 b. *Guidance on assigning values to uncertain parameters in subsurface contaminant fate and transport modelling*. National Groundwater & Contaminated Land report NC/99/38/3. Bristol. 62 pp.
- Fernández Sánchez, J.A. 2001. Aspectos legales y administrativos de las aguas minerales. En: *Las aguas minerales en España*. IGME, 33-40.
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. En: Van Duijvenbooden, W. y Van Waegeningh, H. G. (eds.). *Vulnerability of soil and groundwater to pollution*, Vol. 38. 69 – 86. TNO committee on hydrological research. La Haya.

- Fournier R.O. y Truesdell, A.H. 1973. *An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.
- Franke, O.L., Reilly, T.E., Pollock, D.W. and LaBaugh, J.W. 1988. *Estimating areas contributing recharge to wells. Lessons from previous studies*. U. S. Geological Survey, Circular 1174. 16 pp.
- GEOCISA. 1999. *Solicitud de aprovechamiento de las aguas minero-medicinales del manantial de Laias nº 38 (municipio de Cenlle, Ourense). Tomo nº 3: Anejos. Anejo nº 2: Propuesta de delimitación del perímetro de protección*.
- Goldscheider, N.; Klute, M.; Sturm, S. y Hölz, H. 2000. The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für angewandte geologie.*, 46 (2000) 3. 157-166.
- Hoffman, W. y Lillich, W., 1973. Problematik der bemessung der engeren schutzzones für lockergesteinsaquifere. *Deutsch. Geol.* Hannover.
- Hölting, B.; Haertle, T.; Hohberger, K.H.; Nachtigall, K.H.; Villinger, E.; Weinzierl, W. y Wrobel, J.P. 1995. Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. *Geol. Jb.*, C 63, 5-24. Hannover.
- Horsley, S. W., 1983. Delineating zones of contribution for public supply wells to protect groundwater. *National water well conference. Proceedings*. Worthington, Ohio.
- IGME, 1974. *Mapa Geológico de España E:1:50.000 Hoja 187 Orense*. Mapa y memoria.
- IGME, 1974 b. *Mapa Geológico de España E:1:50.000 Hoja 225 Ribadavia*. Mapa y memoria.
- IGME, 2000. *Unidades Hidrogeológicas de España: mapa y datos básicos síntesis y actualización de los estudios realizados*. Mapa, memoria y CD-ROM.
- IGME, 2001 a. *Las aguas minerales en España*. Baeza Rodríguez-Caro, J., López Geta, J.A. y Ramírez Ortega, A. (eds.). 454 pp.
- IGME, 2001 b. *Aguas subterráneas, paisaje y vida. Acuíferos de España*. Pozo Gómez, M. del, Durán Valsero, J.J. (eds.). Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº 2. 470 pp.
- IGME, 2004. *Mapa Hidrogeológico de Galicia E:1:200.000*
- INE, 2004. *Nomenclátor. Relación de unidades poblacionales*. http://www.ine.es/pls/nomen/p_nomenwel.leer_nomen
- Käss, W. 1998. *Tracing technique in geohydrology*. A.A. Balkema, Rotterdam. 580 pp.
- Lallemand–Barrès, A. y Roux, J.C. 1989. *Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée a la consommation humaine*. Manuels et methodes. Éditions du BRGM. Orleans, 221 pp.

- López Arechavala, G. 2000. Metodología y técnicas de investigación y evaluación de los recursos hidrominerales. En: *Panorama actual de las aguas minerales y mineromedicinales en España*. IGME, Madrid, 237-248.
- Martínez Navarrete, C. y López Geta, J.A., 2001. Perímetros de protección de aguas subterráneas y del medio ambiente relacionado. En: Iribar, V., Grima, J y Sánchez-Vila, X. (eds.) *Las aguas subterráneas en el Plan Hidrológico Nacional*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 89-97.
- Martínez Navarrete, C y García García, Á., 2003. *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio*. Serie Hidrogeología y Aguas subterráneas Nº 10, IGME, Madrid, 274 pp.
- Melioris, L. 2000. Aguas minerales: Génesis, aprovechamiento y protección de las mismas. En: *Panorama actual de las aguas minerales y mineromedicinales en España*. IGME, Madrid, 21-37.
- Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM). 2002 a. *Documento base sobre los procedimientos a seguir en la implantación de los perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas para abastecimiento*. Madrid. 342 pp.
- Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM) 2002 b. *Guía para la delimitación e implantación de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas para abastecimiento público*. Madrid. 112 pp.
- Moreno Merino, L.; Martínez Navarrete, C.; López Geta, J.A. y Navarrete Martínez, P. 1991. *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. IGME, Madrid, 289 pp.
- Morris, B.L. 1994. Providing the tools: The British experience in groundwater protection zoning. 2º Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Santiago de Chile.
- Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) y l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG). 2003. *Guide pratique. Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré. Méthode des distances, méthode des isochrones, méthode DISCO*. Berna. 83 p.
- Quinlan, J.F., 1989. *Groundwater monitoring in karst terranes: Recommended protocols and implicit assumptions*. USEPA Environmental Monitoring Laboratory. Las Vegas. EPA-600/X-89/050. 79 pp.
- Rayne, T.W., Bradbury, K.R. y Muldoon, M.A., 2001. Delineation of capture zones for municipal wells in fractured dolomite, Sturgeon Bay, Wisconsin, USA. *Hydrogeology Journal*, 9 (5), 432-450.
- Robinson, J.N. y Barker, J.A. 2000. *A fractured/fissured approach to GPZs*. Environment Agency R&D Project Record W6/020/1.
- Robinson, J.N. y Barker, J.A. 2001. Probability-based protection zones in fractured aquifers. Implications for land use planners. *Protecting groundwater*. Birmingham. Conference Proceedings, 221-231.
- Theis, C.V., 1935. *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage*. American Geophysical Union Transactions, 16, 529-524.

- Unión Europea. 2000. *Directiva 2000/60 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. Diario Oficial nº L 327, de 22-12-2000, 0001-0073.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1987. *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*. Technical Report EPA-440/6-87-010. Environmental Protection Agency, Office of Water. Washington.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1991. *Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks*. Technical Report EPA-570/9-91-009. Environmental Protection Agency, Office of Water. Washington. 144 pp.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1993. *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*. Technical Report EPA-440/5-93-001. Environmental Protection Agency, Office of water, Office of groundwater protection. Washington, D.C.
- Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. <http://www.geol.vt.edu/>